

## Abschlussbericht SUGAR II

### (A: Methoden zur Exploration und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten)

Zuwendungsempfänger: GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Vorhabenbezeichnung: Charakterisierung von Gashydratlagerstätten und Überwachung des Erdgasförderprozesses

Förderkennzeichen: 03G0819A

Laufzeit des Vorhabens: 1.7.2011 – 30.6.2014

#### I. Kurze Darstellung

##### 1. Aufgabenstellung

Das **Teilprojekt A1-2** beschäftigt sich mit der Erfassung und Auswertung von Gasblasen in der Wassersäule (WCI) mittels Multibeam Systemen (Fächerecholoten). Ebenso wie in der ersten Phase wurden diese Arbeiten in enger Kooperation mit dem Projektpartner ELAC durchgeführt. In der ersten SUGAR Phase wurden dazu Prozessabläufe erarbeitet und eine Software erstellt, die erstmals eine Nachbearbeitung und individuelle Auswertung der WCI Daten erlaubt. Eine methodische Analyse der Gasblasen (Bewegungsrichtung, Volumina, etc.) ist aber noch nicht möglich gewesen. Daher ist für die zweite SUGAR Phase die quantitative und volumetrische Erfassung von Gasblasen in der Wassersäule sowie die Vektorbestimmung der Auftriebsbewegung eine wesentliche Aufgabe gewesen. Damit verbunden ist die Erarbeitung einer Kalibration von Multibeam Systemen anhand künstlicher Gasaustritte und Referenz-Rückstreukörpern. Felderfahrungen der ersten SUGAR Phase haben gezeigt, dass es notwendig ist einzelne Verfahrensschritte zu überarbeiten und das Datenvolumen zu reduzieren. Dazu gehören vereinfachte Echtzeiterfassungsprozesse und komplexe Survey-orientierte Prozessketten.

Die Aufgabenstellung in **Teilprojekt A2-2** zielte auf die Verbesserung seismischer Signalqualität für 3D reflexionsseismische Vermessungen (P-Cable) und seismische Analyseverfahren von Ozean-Boden Seismometern (OBS) zur Bestimmung der Sedimentmatrix. Mit dem hoch auflösenden P-Cable 3D Streamersystem können in Verbindung mit GI Druckluftpulsern (Airgun) seismische Volumenkartierungen mit bis zu 200 Hz (6 m Wellenlänge) und höheren Frequenzen erfolgen. Dabei hat sich gezeigt, dass Strömungen und Wellenbewegungen häufig zu einer deutlichen Abweichung von der gewünschten Schlepptiefe der Streamer führen. Das Schallsignal des Ghost (Oberflächenreflexion) wirkt dabei störend auf das Seismogramm ein. Insbesondere sind Änderungen der Frequenz mit zunehmender Signallaufzeit durch die verfügbaren Standard Arbeitsschritte der Seismik nicht zu bereinigen. Hierzu sollte im Teilprojekt A-2.1 entsprechende Software erarbeitet werden. TP A2-2 wird geeignete Datensätze generieren und aufbereiten, sowie die Auswertung neuer Ergebnisse übernehmen.

Eine wichtige Information für die Gasförderung aus Hydratlagerstätten ist die Kenntnis von Sedimenteigenschaften der Lagerungsmatrix. Insbesondere die Abgrenzung von permeablem, sandigem Speichergestein zu abdichtenden tonigen Lagen sind hier von Interesse. Weitwinkelaufnahmen von OBS Geräten werden parallel zu den P-Cable Vermessungen erhoben, um zunächst über die Analyse von Kompressionswellen Schallgeschwindigkeiten bereit zu stellen. Neben der profilorientierten Laufzeitauswertung können die azimutalen Beobachtungen der OBS verwendet werden, um Aussagen zur Anisotropie zu machen, einem Indiz für Tonlagen im Sediment. Mit den Seismometern können darüber hinaus konvertierte Scherwellen registriert werden. Gemeinsam mit den Kompressionswellen können hieraus Dichtemodelle und Elastizitätsmoduli abgeleitet werden. Diese Möglichkeiten werden in der routinemäßigen Auswertung nicht oder nur selten genutzt. Insbesondere die äußerst dicht vermessenen seismischen 3D Aufnahmen

bieten hier ein neues, bisher nicht verfügbares Informationsvolumen für OBS. Im Teilprojekt A2-2 sollten daher die notwendigen Prozessingsequenzen erarbeitet werden und für eine routinemäßige Bearbeitung bereitgestellt werden.

Das Ziel des **Teilprojektes A2-5** war die Quantifizierung von Methanhydratkonzentrationen mittels einer gemeinsamen Auswertung elektromagnetischer und seismischer Daten. Es umfasste auch die Entwicklung eines Datenmodellierungsalgorithmus, die elektromagnetische Datenerfassung in einem marinen Testgebiet vor Norwegen sowie die Auswertung der elektromagnetischen Daten im Zusammenhang mit bestehenden seismischen Daten.

In **Teilprojekt A3** wurden unterschiedliche Methoden zur Simulation der räumlichen Verteilung und der Quantifizierung submariner Gashydratvorkommen angewendet. Im Vordergrund stand dabei, wie auch in Phase I, die Entwicklung numerischer Becken-Modelle, die eine Abbildung der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Gashydratvorkommen auf regionaler Skala ermöglichen. Das ursprünglich gemeinsam mit dem Schlumberger Aachen Technology Center (AaTC) entwickelte „Gashydrat-Modul“ für die Beckensimulations-Software PetroMod® sollte hierbei verbessert und erweitert werden. Darüber hinaus sollten Arbeiten zu globalen Prognosen abgeschlossen werden.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

**A1-2:** Der Mitarbeiter Dr. Jens Schneider von Deimling hat das Projekt zugunsten einer 5-jährigen Projektanstellung im Exzellenz Cluster Future Ocean vorzeitig verlassen. Die Wissenschaftlerstelle des Teilprojektes wurde zugunsten der Konstruktion einer künstlichen Gasaustrittsstelle (Bubble-Box) anschließend in eine Technikerstelle umgewandelt. Eine für den Abschlusstest beantragte Ausfahrt mit FS ALKOR wurde erst zum November 2014 in die Fahrplanung integriert. Es wurde daher versucht Feldtests der ELAC Multibeam Anlage und der Bubble-Box auf anderen Forschungsfahrten zu integrieren. Zusätzlich zu der Testanlage SBE3050 des Projektpartners ELAC konnte zeitweise eine R2Sonic Anlage mit höheren Signalfrequenzen eingesetzt werden.

**A2-2:** Die wissenschaftlichen Projektstellen konnten erst verspätet zum Oktober 2011 besetzt werden. Dr. Gareth Crutchley, zuständig für die Bearbeitung der reflexionsseismischen 3D P-Cable Datensätze hat das Projekt zugunsten einer unbefristeten Anstellung in Neuseeland zum Mai 2013 bereits wieder verlassen. Begleitend zum Projekt SUGAR wurde wiederholt versucht Kooperationen mit internationalen Partnern insbesondere für Feldtests zu vereinbaren. Für ein OBS Monitoring während Testbohrungen standen hier zunächst Erfolg versprechende Gespräche u.a. mit dem KIGAM in Süd Korea. Nach Verzögerungen in dem dortigen Hydratprogramm konnten diese Testmessungen nicht ausgeführt werden. In Ergänzung zum ursprünglichen Projektantrag wurde eine Forschungsfahrt in das Donau Delta im Schwarzen Meer beantragt. Die Ausfahrt MSM34 mit FS MARIA S. MERIAN diente in zwei Fahrabschnitten vom 06. Dezember 2013 bis 16. Januar 2014 seismischen Vermessungen. Die gewonnenen regionalen Übersichtsprofile und hochauflösenden 2D und 3D seismischen Vermessungen legen die Grundlage für eine detaillierte Untersuchung einer möglichen SUGAR Testlokation in der dritten Phase des Projektes.

**A2-5:** Für das Teilprojekt war eine Postdoktoranden-Stelle über 36 Monate vorgesehen. Die Stelle sollte ursprünglich mit der damaligen GEOMAR-Mitarbeiterin Frau Dr. A. Avdeeva besetzt werden, welche auch den, in dem Projekt einzusetzenden 3D CSEM Modellierungscode entwickelt hatte. Frau Avdeeva hat jedoch kurz vor Beginn der Förderung des Projektes eine Stelle in England angenommen. Daher musste ein neuer Vorwärtsmodellierungscode entwickelt und die Stelle anderweitig besetzt werden. Sie wurde als Doktorandenstelle an M. Sommer vergeben, welcher sich in seiner Diplomarbeit mit der 3D Modellierung von marinen CSEM Daten befasst hat und damit den nötigen numerischen Hintergrund hatte. Des Weiteren wurde zusätzlich Dr. A. Swidinsky teilszeit auf das Projekt eingestellt, der sich mit möglichen Kopplungen von seismischen und elektromagnetischen

Daten sowie mit der Datenverarbeitung der innerhalb des Projekts aufgenommenen 3D CSEM Daten befasst hat. Da Herr Swidinsky eine Professur in den USA annahm, musste auch sein Vertrag vorzeitig aufgelöst werden. Die Restgelder wurden dann für Kurzeitverträge des Doktoranden David Bösing und weiterhin für eine Einstellung des PostDoc D. Czukur verwendet. Trotz den gegenüber der Planung geänderten, ungünstigeren Personalbedingungen konnte jedoch die eigentliche Aufgabenstellung erfüllt werden. Die dem Antrag zugrunde liegende Ausfahrt wurde wie geplant durchgeführt und es wurde ein weiterer ursprünglich nicht geplanter elektromagnetischer Datensatz mit dem neuen System Vulcan aufgenommen. Die Daten wurden erfolgreich analysiert und es konnte dokumentiert werden, dass durch die gemeinsame Interpretation von seismischen und elektromagnetischen Daten Methanhydratkonzentrationen genauer bestimmt werden können, als dies bei einzelnen Messungen möglich ist. Restmittel aus dem Projekt wurden für die Akquise von elektromagnetischen Daten im Donau Delta des Schwarzen Meers verwendet, um eine geeignete Lokation für die in SUGAR III geplante Testbohrung zu finden und so die in diesem Teilprojekt entwickelten Methoden einzusetzen.

**A3:** Die Rahmenbedingungen zur Durchführung dieses Projektes waren sehr gut; insbesondere begünstigt durch die enge und fruchtbare Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Schlumberger AaTC. Die Beckensimulations-Software PetroMod® ist weltweit ein Standard Exploration konventioneller Kohlenwasserstoff-Vorkommen. Dieses Know-how auf dem Gebiet der 3-D Beckensimulation konnte erfolgreich mit der Erfahrung auf dem Gebiet der Gashydratforschung am GEOMAR verbunden werden.

### **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

#### **A1-2:**

Der vorgelegte Zeitplan des Projektes wurde eingehalten. Zur Erprobung der Software und Prozessroutinen (S) sowie des ELAC Multibeam (M) und der Bubble-Box (B) konnten folgende Expeditionen genutzt werden: 2011 – RV URANIA (S), 2012 - R/V POLARIS (M, S), 2012 MS MEANDER (S), 2013 - FS SONNE (M), 2013 - FS POSEIDON (M, S), 2014 – FS POSEIDON (M,S,B), 2014 - FS ALKOR (M, S, B)

#### **A2-2:**

Durch die personellen Veränderungen wurden die Arbeiten zu hochauflösenden 3D P-Cable Datensätzen mit Einwilligung des Mittelgebers an den Projektpartner TEEC übertragen. Die notwendigen Datensätze wurden wie vereinbart bereitgestellt.

Für eine abschließende Verifikation der SUGAR Technologie in einem Feldtest ist es notwendig einen möglichen Standort in europäischen Gewässern ausfindig zu machen. Modellierungen von Hydratstabilitätsgebieten zufolge kommen dafür nur der norwegische Kontinentalrand und das Schwarze Meer in Frage. Nach Informationen norwegischer Kollegen (Statoil, Uni Tromsø) sind in Norwegen aber nur sehr kleinräumige Hydratvorkommen in sandigen Lagen zu erwarten, die nicht für die SUGAR Technologie geeignet sind. Demgegenüber bietet das Donaudelta im Schwarzen Meer mit seinen Palaeo-Canyons die vielversprechendste Grundlage für geeignete Hydratlagerstätten. Seismische Indikatoren wie ein großflächiger BSR sind zudem auch publiziert. Aus diesem Grund wurde eine Forschungsfahrt zum Donaufächer an Bord des FS MARIA S. MERIAN in das Schwarze Meer beantragt und vom 06. Dez. 2013 – 05. Feb. 2014 (MSM34 & MSM35) durchgeführt. Das Teilprojekt A2-2 hat dabei durch Neuverteilung der Aufgabenschwerpunkte die Koordination und Ausführung der seismischen Arbeiten auf dem ersten und zweiten Fahrtabschnitt durchgeführt. 28 regionale Seismikprofile wurden genutzt, um drei Arbeitsgebiete für Detailstudien mit hochauflösender 2D und 3D Seismik sowie OBS zu vermessen. Die äußerst umfangreichen Arbeiten zur Nachbereitung der Navigation (insbesondere für die P-Cable 3D Arbeiten) und erste Analysen der Schallgeschwindigkeiten wurden als Vorbereitung auf die dritte Phase im Projekt SUGAR aufgenommen.

## **A2-5:**

### *Datenerfassung und Datenverarbeitung:*

Die Ausfahrt M87-2 fand vom 5.5.2012 bis 27.05.2012 auf dem Forschungsschiff Meteor statt. Geophysikalische Datenaufnahme in dem für das SUGAR Projekt relevanten Nyegga-Gebiet fand vom 17.5. bis zum 26.5.2012 statt. Durch Kollaboration mit der University of Southampton konnten im Nyegga-Gebiet sowohl die innerhalb von SUGAR angestrebten 3D hochauflösenden tomographischen elektromagnetischen Daten als auch zusätzliche regionale elektromagnetische 2D-Profile einmal mit sehr geringer und einmal mit sehr tiefer Eindringung aufgenommen werden. In diesem Gebiet (CN03) wurden im EU-Projekt HERMES dreidimensionale Ozeanseismometer-Daten aufgenommen, die von Andrea Plaza-Faverola im Rahmen ihrer Doktorarbeit tomographisch invertiert wurden (Plaza-Faverola et al., 2010). Diese Ergebnisse dienen unserem Teilprojekt als Basis für die geophysikalischen Vergleiche. Des Weiteren haben wir die Horizontalkomponenten dieser vorhandenen Daten analysiert. Leider zeigten diese Daten auslagenbedingte Störgeräusche, die eine weitere Verwendung in Form von Scherwellengeschwindigkeitsanalysen für die gemeinsame Auswertung mit den elektromagnetischen Daten unmöglich machten. Der von GEOMAR aufgenommene 3D tomographische Datensatz hat eine neuartige Geometrie und erforderte deshalb die Entwicklung neuer Datenprozessierungsalgorithmen. Hierzu haben wir eine Methode entwickelt, bei der die rotationsinvarianten Antwortfunktionen vorwärtsmodelliert werden. Diese Methode wurde von Dr. Czukur erfolgreich auf die während M87/2 aufgenommenen elektromagnetischen Daten angewendet.

### *Modellierungsalgorithmen:*

Die geplante Entwicklung des Joint-Inversion-Algorithmus wurde der geänderten Personalsituation angepasst. Der grundsätzlich komplementäre Informationsinhalt von seismischen und elektromagnetischen Daten wurde anhand von geschichteten Gashydratmodellen analysiert. Anhand dieser Analyse wurde eine optimale Art der Datenauswertung bestimmt. Über die Projektdauer haben wir einen 3D CSEM Modellierungsalgorithmus optimiert, der einen Zusammenhang zwischen 3D elektrischen Widerstandsmodellen und 3D CSEM Daten herstellt und welcher zur Analyse des aufgenommenen Datensatzes benutzt wurde.

### *Datenauswertung:*

Der prozessierte elektromagnetische und der aus dem EU Projekt HERMES stammende seismische Datensatz wurden kombiniert ausgewertet. Die Auswertung erfolgte zunächst anhand von 1D-Inversionen der elektromagnetischen Daten und wurde dann ausgeweitet auf eine 3D Modellierungsstudie der elektromagnetischen Daten. Hierbei fließen die Strukturen, die aus der Tomographie des 3D seismischen Datensatz bestimmt wurden, als Anfangsbedingungen ein. Die Gashydratverteilung innerhalb der Fluidaufstiegsstruktur wurde für verschiedene Gashydratverteilungs- und Gashydratentstehungsmodelle kombiniert aus den elektrischen Widerständen und seismischen Geschwindigkeiten hergeleitet. Diese Herangehensweise erlaubte eine genauere Bestimmung der Gashydratkonzentration und lässt Aussagen über die Dynamik der Gashydratentstehung zu.

## **A3:**

Der Ablauf des Projektes entsprach prinzipiell dem des Antrags. So wurden die Arbeiten zur globalen Vorhersage von Gashydratvorkommen mit 2 Publikationen abgeschlossen. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Beckenmodellierung neben dem Hauptarbeitsgebiet (Alaska North Slope) ein weiteres Arbeitsgebiet (Hydrate Ridge) bearbeitet. Abschließende Publikationen sind in Vorbereitung.

#### **4. wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

##### **A1-2:**

Mit den, in der ersten SUGAR Phase erarbeiteten, Prozessroutinen und Software wurde die derzeit einzige Möglichkeit zur Nachbearbeitung von WCI Daten geschaffen. Ebenso war durch die Programmierung eines Datenkonverters in das GWC Format am GEOMAR der Zugang für eine räumliche Darstellung der Gasblasen in der 3D Visualisierungssoftware FLEDERMAUS erstmals möglich geworden.

##### **A2-2:**

Mit dem hochauflösenden, seismischen Mehrkanalsystem P-Cable 3D steht ein neues Werkzeug zur Verfügung, das besonders in den für SUGAR wichtigen oberen Sedimentschichten detaillierte räumliche Abbildungen des Untergrundes ermöglicht. Trotz der relativ kurzen Streamersegmente hat sich in den ersten Datensätzen eine gewisse Sensitivität für Schallgeschwindigkeiten bei größeren Laufzeiten gezeigt. Daher werden die 3D Vermessungen von Ozean-Boden Seismometern begleitet. Die Einsatzzeit der Forschungsschiffe ist im Gegensatz zu industriellen Vermessungen strikt begrenzt, d.h. auch bei weniger geeigneten Seegangsbedingungen muss die Vermessung fortgesetzt werden. Beeinflusst durch Strömung und Wellengang variiert dabei die Tiefenlage der Streamersegmente zeitweise um mehrere Meter. Dadurch kann sich das Ghostsignal der Meeresoberfläche soweit in seiner Laufzeit verändern, dass es destruktiv auf die Nutzsignale wirkt. Dies ist besonders bei den frequenzreduzierten späteren Einsatzzeiten der Fall. Um die Auflösung der Daten in dieser Hinsicht zu verbessern, wurde mit dem Partner TEEC die Entwicklung eines Deghosting Verfahrens angestrebt.

Ozean-Boden Seismometer sind ein seit Jahrzehnten bewährtes Instrument, um vornehmlich mittels Refraktionsseismik marine Krustenmodelle unterhalb des Ozeanbodens zu erstellen. Aber auch die hochauflösenden Vermessungen im Feld der Gashydratforschung können von den Informationen der OBS profitieren. Hier wird aufgrund der kurzen Profillängen jedoch meistens nur auf Reflexionseinsätze zurückgegriffen, deren Interpretation über das Strukturgerüst aus der Streamerseismik gestützt wird. Obwohl nahezu immer über vier Komponenten OBS konvertierte Scherwellen registriert werden, gehört deren Auswertung wegen der komplexen Analyseverfahren zu den Ausnahmen. Die Kombination von Kompressionswellen- und Scherwellenmodellen liefert zusätzlich Aufschlüsse über Dichteverteilungen und elastische Parameter des Untergrundes. Daher sollen Bearbeitungssequenzen erstellt werden, die eine routinemäßige Vorbereitung und Auswertung dieser Informationen ermöglicht. Durch die Beobachtung der Schallsignale während der 3D Reflexionsvermessung können mit dieser modernen Aufnahmegeometrie nun auch vollständige azimutale Auswertungen erfolgen. Dafür mussten bisher gesonderte Experimente angelegt werden. Auch hierbei sind keine Routineprozeduren etabliert, können aber in Bezug auf die Detektion von gerichteten Sedimentationsmaterial wie z.B. Tonmineralen hilfreich sein und waren Ziel im Teilprojekt A2-2.

##### **A2-5:**

Die geophysikalische Quantifizierung von Gashydraten ist ein wesentlicher Faktor für die Einschätzung der Eignung eines Hydratvorkommens als Energiequelle aber auch als CO<sub>2</sub> Lagerstätte. Wie wir in einem Technologiereview dargestellt haben (Berndt et al., 2012), kann auf Gashydratvorkommen aus seismischen (z.B. Bünz und Mienert, 2004, Bünz et al., 2003) oder elektromagnetischen Messungen (Edwards, 1997, Schwalenberg et al, 2010) geschlossen werden. Allerdings ist die auf Einzelauswertung von seismischen und elektromagnetischen Messungen beruhende Abschätzung von Gashydratmengen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Zur genaueren Abschätzung der Hydratkonzentrationen ist es sinnvoll, den sich ergänzenden Informationsgehalt von Controlled Source Electromagnetics (CSEM), Reflexionsseismik und seismischen Weitwinkeldaten von Ozeanbodenseismometern (OBS) zu nutzen. Während strukturelle Informationen aus der Reflexionsseismik schon oft in der Analyse von elektromagnetischen Daten als a-priori Informationen genutzt wurden (Schwalenberg et al., 2010, Weitemeyer et al., 2000), sind bisher noch keine aus der Analyse der aus Ozeanbodenseismometer-Daten stammenden Geschwindigkeitsmodelle im Zusammenhang mit elektromagnetischen Daten ausgewertet worden um Methanhydratkonzentrationen genauer zu bestimmen. Dies haben wir in diesem Teilprojekt erfolgreich erprobt.

Die Validierung der gemeinsamen Untersuchung erforderte einen geeigneten Felddatensatz. Um sicherzustellen, dass genügend Hintergrundinformation zur Verfügung stehen, wurde das gut untersuchte Nyegga-Gebiet an der Grenze zwischen Møre- und Vøring-Becken im südöstlichen Teil des Vøring-Plateaus mit seinen zahlreichen Fluidaustrittsstrukturen ausgewählt. Dieses war aus dem gleichen Grund auch schon das Arbeitsgebiet des abgeschlossenen EU-Projektes HERMES. Die früheren Untersuchungen in diesem Gebiet hatten ergeben, dass sich dort unter einem starken Bottom Simulating Reflector (BSR) eine mächtige Gasschicht (Bouriak et al., 2000, Bünz et al., 2003; Mienert et al., 1998; Hustoft et al., 2007) befindet. Der BSR ist ein direkter Hinweis auf Hydratvorkommen. Die obengenannten dreidimensionalen, kurzabständigen OBS-Experimente hatten ferner gezeigt, dass es starke laterale Variationen der Hydratkonzentration gibt, die mit Fluidaufstiegsstrukturen zusammenhängen (Plaza-Faverola et al. 2010).

Da hiermit schon verschiedene seismische Daten für das Projekt zur Verfügung standen, erforderte die Feldkampagne nur die Akquise von elektromagnetischen Daten. Diese wurden anhand eines neuartigen 3D tomographischen CSEM Systems aufgenommen, welches sich besonders zu hochauflösenden Untersuchungen einer dreidimensionalen geologischen Struktur eignet. Das System besteht aus nodalen elektromagnetischen Empfängern, welche freifallend auf den Meeresboden ausgebracht werden und dort elektrische Feldvariationen durch zwei orthogonale horizontale Dipole aufzeichnen. Das Design der Empfänger und der Bau des Prototypen erfolgte im Rahmen von SUGAR I; der Bau mehrerer Empfänger wurde durch Forschungszuwendungen von den Industriepartnern realisiert.

Der Meeresgrund wird bei dieser Methode tomographisch durchleuchtet, indem der von GEOMAR neu entwickelte, schiffgestützte, elektromagnetische Testsender von verschiedenen Positionen aus elektromagnetische Wellen in zwei Polarisationsrichtung mit zwei orthogonalen Dipolen ausstrahlt. Zusätzlich zu diesem neuentwickelten Testinstrument wurde elektromagnetische Energie durch die Verwendung eines traditionellen geschleppten Hochleistungssenders (DASI) erzeugt und von unseren Empfängern aufgenommen. Der DASI-Sender wurde von der University of Southampton ausgeliehen. Um die erforderliche, möglichst genaue Platzierung der Empfänger zu gewährleisten wurde das HyBIS System von Southampton benutzt.

### **A3:**

Gashydrate entstehen im Meeresboden überall dort, wo es neben den geeigneten Druck- und Temperaturbedingungen (Gashydrat-Stabilitätszone, GHSZ) eine ausreichend hohe Konzentration an Methan und anderen im Porenwasser gelösten Kohlenwasserstoffen gibt (z.B. Sloan, 1990). Nach heutiger Erkenntnis ist der größte Anteil an Gashydratvorkommen auf die biogene Umwandlung von organisch gebundenem Kohlenstoff in Methan zurückzuführen, die in den oberen Hunderten von Metern submariner Sedimentablagerungen stattfindet. Modellrechnungen deuten darauf hin, dass im Durchschnitt in Kontinentalhangsedimenten generell Porenraumsättigungen von weniger als 0,1 vol.% vorliegen, wohingegen deutlich höhere Konzentrationen von einigen vol.% in Sedimenten von Hochproduktionsgebieten zu finden sind (Wallmann et al., 2012). Zu potentiell abbaubaren Gashydrat-Anreicherungen im Untergrund kann es nur dann kommen,

wenn ein vertikaler Aufstieg von Porenwässern (Fluiden) und vor allem freiem Gas stattfindet, was für eine deutlich erhöhte Zufuhr an Methan sorgt (z.B. Torres et al., 2004; Haeckel et al., 2004; Wallmann et al., 2006; Wallmann et al., 2012).

Seit den frühen 1980er Jahren gab es eine Vielzahl von Untersuchungen, mit dem Ziel, verbesserte Prognosen hinsichtlich der global in Gashydraten gebundenen Menge an Methan zu erstellen. Eine von Pinero et al. (2013) erstellte, aktuelle Übersicht (Abb. 1) zeigt, dass nach jüngsten Schätzungen die Gesamtmenge bei maximal einigen hundert Gigatonnen Kohlenstoff liegt. Eine weitere Eingrenzung dieser Werte scheint derzeit nicht möglich zu sein, was insbesondere daran liegt, dass Informationen über wichtige Steuerparameter, wie z.B. die Akkumulation organischer Substanz am Meeresboden über geologisch relevante Zeiträume (Ma), global nur in einer sehr begrenzten Genauigkeit verfügbar sind.

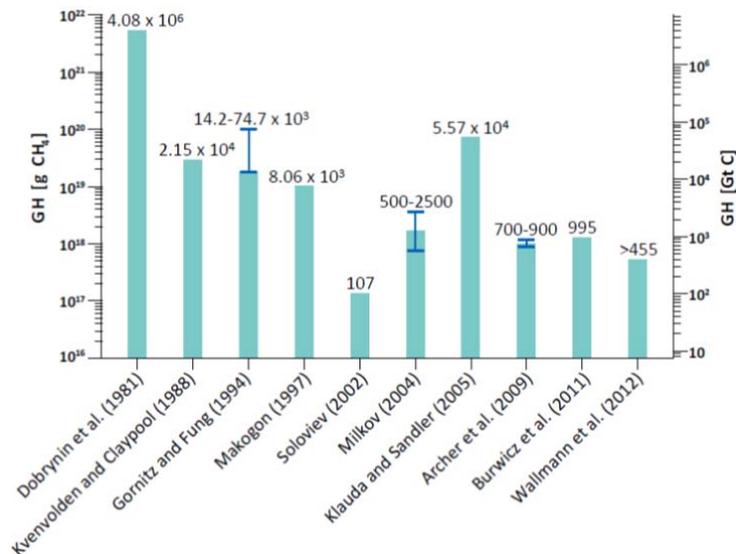


Abbildung 1: Globale Schätzungen der in marinen Gashydraten gespeicherten Kohlenstoffmenge (aus Pinero et al, 2013).

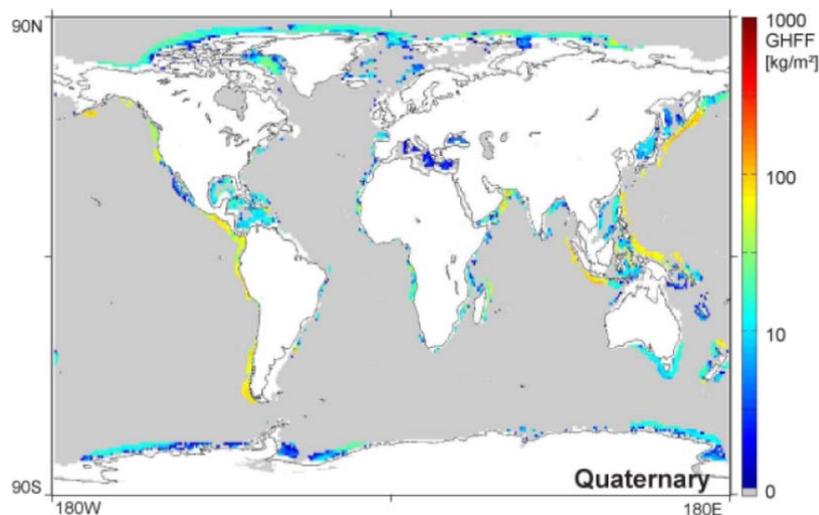


Abbildung 2: Globales Verteilungsmuster submariner Gashydratkonzentrationen unter Berücksichtigung vollständiger Kompaktion an passiven Kontinentalrändern sowie einer durchschnittlichen Porenwasseraufstiegsrate an aktiven Kontinentalrändern von 0,02 cm pro Jahr (aus Pinero et al, 2013).

Dennoch sind die vorhandenen Schätzungen, wie z.B. von Pinero et al (2013) gut geeignet, Gebiete potentieller Gashydrat Hotspots näherungsweise einzugrenzen. Ein Beispiel für das zu erwartende globale Verteilungsmuster submariner Gashydraten unter Berücksichtigung von Kompaktion und vertikalem Fluidaufstieg zeigt Abbildung 2 (Gesamtmenge von ca. 550 Gt Kohlenstoff; Pinero et al., 2013). Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass Aufstiegseschwindigkeiten von Fluiden oder die Migration von freiem Gas (im gezeigten Beispiel nicht berücksichtigt) extrem schwierig zu ermitteln sind und zudem starken regionalen und zeitlichen Schwankungen unterliegen. Besonders bei globalen oder großräumigen Prognosen, kann hier nur von durchschnittlichen Näherungswerten ausgegangen werden.

Bei kleinräumigen, regionalen Studien ist es generell möglich, entsprechend genauere Näherungswerte zu ermitteln, allerdings ist die gegenwärtige Anzahl regionaler Schätzungen von Gashydratmengen sehr begrenzt (z.B. Milkov und Sassen, 2003) und die verwendeten Methoden sehr unterschiedlich und damit auch schlecht vergleichbar. Der in diesem Projekt gewählte Ansatz der Beckenmodellierung mit PetroMod als Prognosewerkzeug führt Daten und Kenntnisse aus unterschiedlichen Disziplinen zusammen und ermöglicht so eine integrative Gesamtschau und umfassende Interpretation. Von besonderer Bedeutung sind hier die Entstehung von Wegsamkeiten durch erhöhte Porendrucke bei Akkumulation von freiem Gas (Boudreau et al., 2005) oder Gashydrat (Daigle and Dugan, 2010). Solche Wegsamkeiten können bei der Simulation mit PetroMod explizit berücksichtigt werden (Pinero et al., 2014) und stellen somit einen entscheidenden Vorteil gegenüber bisherigen Prognosemethoden dar. Das in PetroMod vorhandene „Gashydrat Modul“ wird derzeit bereits von anderen Arbeitsgruppen verwendet (Kroeger et al., 2014). Vergleichbare Modell-Ansätze zur Gashydratprognose sind uns nicht bekannt.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

**A1-2:** Innerhalb des GEOMAR wurde die Entwicklung der Bubble Box in enger Zusammenarbeit mit der Forschungseinheit Marine Biogeochemie Dr. Linke durchgeführt. Technische Beratung und Erfahrungsaustausch für die Konstruktion der Bubble Box erfolgte durch Kooperation mit dem Ostsee-Institut Warnemünde. Lösungsmodelle von CO<sub>2</sub> Gasblasen wurden zur Vorhersage der Prozesse innerhalb der Bubble Box mit Dr. Ira Leifer, University of California, Santa Barbara durchgeführt. Am GEOMAR wurde im Rahmen von SUGAR ein Workshop der Fa. QPS zur Einführung in die Schnittstelleprogrammierung der 3D Visualisierungssoftware Fledermaus organisiert. Weitere Kooperationen ergaben sich mit dem Hersteller hochfrequenter Echolotanlagen R2SONIC (USA).

**A2-2:** Für akademische Zwecke gab es keinen Zugang zu existierenden seismischen Daten im Donau Delta. Daher musste für die regionale seismische Vermessung ein geeignetes Streamersystem gefunden werden. Für diese Aufgabe konnte ein Forschungsabkommen mit dem Institute of Marine Science and Technology, Dokuz-Eylül University, Izmir, Türkei (SeisLab) geschlossen werden. Das System wurde während des ersten Fahrtabschnittes der Reise MSM34 eingesetzt. Die Auswertung der vorläufigen, an Bord gefertigten Brute-Stacks wurde genutzt, um die Zielgebiete für die seismischen und geologischen / geochemischen Detailvermessungen während des zweiten Fahrtabschnittes, sowie für die elektromagnetischen Vermessungen während der folgenden Reise MSM35 festzulegen. Die Kooperation wird über ein DAAD Stipendium am GEOMAR in der dritten Phase des SUGAR Projektes fortgesetzt.

**A2-5:** Die Ausfahrt M87-2 wurde zusammen mit Wissenschaftlern der University of Southampton durchgeführt. Durch die Zusammenarbeit mit Dr. K. Weitermeyer konnten weitere elektromagnetische Daten aufgenommen werden, die die GEOMAR 3D Daten in geringer und großer Tiefe mit 2D Profilen ergänzen.

**A3:** Es erfolgte eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Wissenschaftlern und Institutionen im In- und Ausland. Die intensivste Zusammenarbeit erfolgte naturgemäß mit Schlumberger AaTC (Wolf Rottke, Thomas Fuchs) zur Weiterentwicklung des Gashydratmodul in PetroMod, welches u.a. mittels des geologischen Modells des Alaska North Slope getestet wurde. Die Daten hierzu wurden vom US Geological Survey (Tim Collett, Tom Lorenson) und Schlumberger zur Verfügung gestellt. Die Arbeiten zu den Gashydratvorkommen am Hydrate Ridge erfolgten zusammen mit Marta Torres und Anne Trehu vom College of Oceanic and Atmospheric Sciences der Oregon State University in Corvallis, USA, und Gareth Crutchley vom GNS in Wellington, Neuseeland.

#### Literatur:

- Archer, D., Buffett, B., Brovkin, V. (2009) Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106(20), 596–601.
- Berndt, C.: “Geophysical methods to quantify gas hydrates and free gas in the shallow subsurface: Review and Outlook”, EAGE Workshop Geophysics for Unconventionals, Hamburg, Germany, 9 March, 2012.
- Boudreau, B.P., Algar, C., Johnson, B.D., Croudace, I., Reed, A., Furukawa, Y., Dorgan, K.M., Jumars, P.A., Grader, A.S., Gardiner, B.S. (2005) Bubble growth and rise in soft sediments. *Geology* 33(6), 517–520.
- Bouriak, S., Vanneste, M. and Saoutkine, A., 2000. Inferred gas hydrates and clay diapirs near the Storegga Slide on the southern edge of the Vøring Plateau, offshore Norway, *Mar. Geol.*, 163, 125-148.
- Bünz, S. and Mienert, J., 2004. Acoustic imaging of gas hydrate and free gas at the Storegga Slide, *J. Geophys. Res.* 109, 4102.
- Bünz, S., Mienert, J. and Berndt, C., 2003. Geological controls on the Storegga gas-hydrates system of the mid-Norwegian continental margin, *Earth and Planetary Science Letters*, 209, 291-307.
- Burwicz, E. B., Rüpke, L. H., Wallmann, K. (2011) Estimation of the global amount of submarine gas hydrates formed via microbial methane formation based on numerical reaction-transport modeling and a novel parameterization of Holocene sedimentation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 4562-4576.
- Daigle, H., Dugan, B. (2010) Origin and evolution of fracture-hosted methane hydrate deposits. *J. Geophys. Res.* 115, B11103.
- Dickens, G.R. (2001) The potential volume of oceanic methane hydrates with variable external conditions. *Organic Geochemistry* 32, 1179-1193.
- Dobrynin, V.M., Korotajev, Y.P., Plyushev, D.V. (1981) Gas hydrates-one of the possible energy sources, in: *Long-Term Energy Resources*, eds. R.G. Meyer, J.C. Olson, Pitman, Boston, 727-729.
- Edwards, R.N. 1997. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using a seafloor transient electric dipole-dipole method, *Geophys.*, 62, 63-74.
- Gornitz, V., Fung, I. (1994) Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans, *Global Biogeochemical Cycles* 8, 335–347.
- Haeckel M., Suess E., Wallmann K., Rickert D. (2004) Rising methane gas bubbles form massive hydrate layers at the seafloor. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68(21), 4335-4345.
- Hustoft, S., Mienert, J., Bünz, S. and Nouze, H., 2007. High-resolution 3D-seismic data indicate focussed fluid migration pathways above polygonal fault systems of the mid-Norwegian margin, *Mar. Geol.*, 245, 89-106.
- Klauda, J. B., Sandler, S. I. (2005) Global Distribution of Methane Hydrate in Ocean Sediment. *Energy & Fuels* 19, 459-470.
- Kroeger, K., Plaza-Faverola, Barnes, P., Hill, M., Crutchley, G., Pecher, I. (2014) Methane generation and quantitative hydrate formation modelling, Hikurangi Margin, New Zealand. 8<sup>th</sup> Conference on Gas Hydrates (ICGH8), Beijing (China) 28<sup>th</sup> July – 1<sup>st</sup> August.

- Kvenvolden, K.A., Claypool, G.E. (1988) Gas hydrates in oceanic sediment. U.S. Geological Survey Open-File Report, 88-216.
- Makogon, Y.F. (1997) Hydrates of Hydrocarbons. Penn Well Publishing Company, Tulsa, 504 pp.
- Marquardt, M., Hensen, C., Pinero, E., Wallmann, K., Haeckel, M. (2010) A transfer function for the prediction of gas hydrate inventories in marine sediments. *Biogeosciences* 7, 2925-2941.
- Mienert, J., Posewang, J. and Baumann, M., 1998. Gas hydrates along the northeastern Atlantic margin: possible hydrate-bound margin instabilities and possible release of methane. in *Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change*, pp. 275-291, eds. Henriot, J.-P. & Mienert, J. Geological Society of London.
- Milkov, A. V., Sassen, R. (2003) Two-dimensional modeling of gas hydrate decomposition in the northwestern Gulf of Mexico: significance to global change assessment. *Global and Planetary Change* 36, 31-46.
- Milkov, A.V. (2004) Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews* 66, 183-197.
- Pinero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K. (2013) Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. *Biogeosciences* 10, 959-975.
- Pinero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T., Schenk, O., Wallmann, K. (2014) Gas Hydrate Accumulations at the Alaska North Slope: total assessment based on 3-D Petroleum system modeling. 8<sup>th</sup> Conference on Gas Hydrates (ICGH8), Beijing (China) 28<sup>th</sup> July – 1<sup>st</sup> August.
- Plaza-Faverola, A., Westbrook, G.K., Ker, S., Exley, R.J.K., Gailler, A., Minshull, T.A. & Broto, K. 2010 Evidence from three-dimensional seismic tomography for a substantial accumulation of gas hydrate in a fluid-escape chimney in the Nyegga pockmark field, offshore Norway, *J. Geophys. Res.* 115, B08104.
- Schwalenberg K., M. Haeckel, J. Poort and M. Jegen, 2010. Evaluation of gas hydrate deposits in an active seep area using marine controlled source Electromagnetics: Results from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand, *Mar. Geol.* 272, 79-88.
- Sloan, E. D. (1990) Clathrate hydrates of natural gases; Chapter: Hydrates in the Earth (ed. I. M. Dekker). NY.
- Soloviev, V.A. (2002) Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations. *Russ. Geol. Geophys.* 43, 609-624.
- Torres, M. E., Wallmann, K., Tréhu, A. M., Bohrmann, G., Borowski, W. S., Tomaru, H. (2004) Gas hydrate growth, methane transport, and chloride enrichment at the southern summit of Hydrate Ridge, Cascadia margin off Oregon. *Earth Planet. Sci. Lett.* 226, 225-241.
- Wallmann, K., Aloisi, G., Haeckel, M., Obzhirov, A., Pavlova, G., Tishchenko, P. (2006) Kinetics of organic matter degradation, microbial methane generation, and gas hydrate formation in anoxic marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70(15), 3905-3927.
- Wallmann, K., Pinero, E., Burwicz, E., Haeckel, M., Hensen, C., Dale, A. W., Rüpke, L. (2012) The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach. *Energies* 5, 2449-2498.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### A1-2:

Die Zuwendungsmittel wurden im wesentlichen für die Einstellung von Dr. Jens Schneider von Deimling, bzw. des nachfolgenden Technikers Matthias Wieck verwendet. Verbrauchsmittel sind für den Bau und Betrieb der Bubble Box eingesetzt worden.

Die vorgegebenen Ziele konnten alle erreicht werden. Im einzelnen sind dies:

#### 1. *die Entwicklung von Routinen zur Reduzierung des anfallenden Datenvolumens beim Water-Column-Imaging und neuer Daten-Speicherungs- und Verteilungskonzepte sowohl auf technologischer als auch methodisch-algorithmischer Seite*

Neben der in den hinteren Prozessen der Bearbeitungskette befindlichen Reduktion der Daten, wurde unter das Ziel verfolgt, bereits am Anfang der Datenakquise, die Datenmenge auf ein Minimum zu reduzieren. Die hierbei entwickelten Methoden setzen die Kenntnis der zu erwartenden Wassertiefe voraus. Da Echolotsysteme über einen Algorithmus zur Bodenfindung verfügen, war es möglich mithilfe dieser Daten, das Datenvolumen auf bis zu 50% zu reduzieren, indem die Zeitreihe bereits unterhalb des Meeresbodens abgeschnitten wird. Je nach Wassertiefe und Samplingrate beträgt die Reduktion zwischen 30% und 50 % des gesamten Datenvolumens. Diese Bearbeitung wurde bisher nur extern „simuliert“, also mithilfe von Wassertiefendaten aus zusätzlichen Dateien im Anschluss an die Datengewinnung. Um die Datenreduktion bereits online zu gewährleisten, ist es notwendig, die Wassertiefendaten direkt in das WCI Format zu speichern (siehe technologischen Bericht Fa. ELAC TP A1.1).

#### 2. *die Verbesserung der Objekterkennung und -unterscheidung in der Wassersäule durch Weiterentwicklung vorhandener methodischer Ansätze in Bezug auf 3D-Algorithmen*

Fächerecholot-Daten wurden für Refraktionseffekte, die durch Schallgeschwindigkeitsänderungen in der Wassersäule hervorgerufen werden, korrigiert. Dies erlaubt das Erstellen von georeferenzierten Punktwolken in 3D. Eine anschließende 3D Interpolation (3D Cube) überführte die Punktwolke in ein äquidistantes Raster (Abb. 3 links). Anschließend wurden die Daten tiefpass-gefiltert und in 3D dargestellt (Abb. 3 links). Mittels horizontaler Schnitte lässt sich nun der Durchmesser der Gasfahnen in verschiedenen Wassertiefen exakt bestimmen (Abb. 3 rechts) und bietet somit die Kopplung zu geochemischen Lösungsmodellen an. Werden die Schnitte in schneller Abfolge betrachtet (horizontal oder vertikal), so lässt sich die raum-zeitliche Struktur bzw. Migration der Gasfahne erkennen und interne Prozesse wie Wirbelbildung, Einschichtung von Gasblasen, Gasblasenauflösung, und Strömungsverdriftung werden erkennbar. Diese akustischen Signaturen von Gasfahnen dienen zur Unterscheidung z.B. von Fischeschwärmen oder Schraubenwasser-induzierten Gasblasen. In Kombination mit direkten Gasflussmessungen und Videoaufnahmen kann mit Hilfe der horizontalen Schnitte eine Gesamtgasfluss-abschätzung durchgeführt werden.

#### 3. *die Generalisierung und Vereinfachung der Echtzeiterfassungsprozesse (Online)*

Die bisherige Online Verarbeitung der WCI Daten musste eine mehrstufige Bearbeitungssequenz durchlaufen, bis die Bildschirmdarstellung angezeigt wurde (Abb. 4 oben). Dieser, während der Messung nicht praktikable Zeitaufwand, wurde in gemeinsamer Arbeit von GEOMAR und ELAC verringert. In der neuen Version des WCI Viewers ist die Aufsummierung der Signale nach Laufzeit (Beam-Stack, Abb. 4 unten) oder nach Wassertiefe (Range Stack) möglich. In Verbindung mit einer Nebenpegelunterdrückung werden die Echogramme der vergangenen 5-15 Minuten in guter Qualität an der Online Konsole dargestellt und ermöglichen eine schnelle Erkennung potentieller Ziele ohne

zeitaufwändige Prozessingschritte. Diese Onlinedarstellung ist bisher einmalig und bedeutet einen wesentlichen Vorteil während des Surveying im Vergleich zu anderen Systemen. Zusätzlich erlaubt die neue Verschwenkungsfunktion der Sendefächer, die im Rahmen von SUGAR II erarbeitet wurde, Gasblasen und Geräte unter dem Schiff „auf Station“ effektiv zu erfassen und zu georeferenzieren.

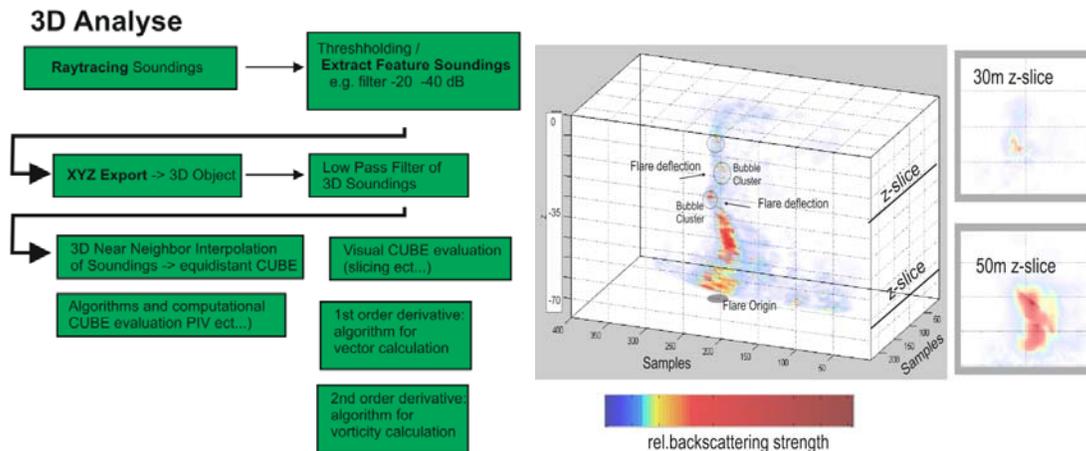


Abbildung 3: Ablaufdiagramm (links) und graphische Darstellung (rechts) zum 3D Blasenmonitoring. Abgebildet ist ein gefilterter und auf ein Gitter projizierter Datensatz des ELAC SB3050 Fächerlots. Die Abtastgröße beträgt 0,2 m. Die Bildeinsätze auf der rechten Seite zeigen Querschnitte durch das 3D Volumen in 30 m und 50 m Höhe über dem Meeresboden. Mit derartigen Schnitten kann die Plumegröße und die akustische Energie ermittelt werden. Die Gesamthöhe des Plume erreicht 70m mit einer maximalen Weite von 6.5 m.

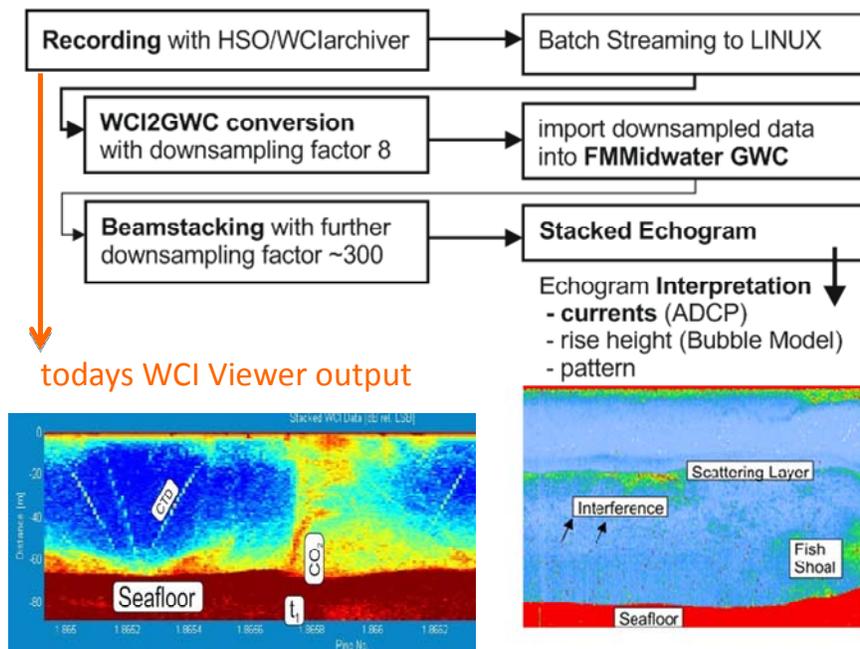


Abbildung 4: Ablaufdiagramm der WCI on-line Bearbeitung mit dem verbesserten Ausgabeverfahren des Beam-Stack. Die Erfassung der CTD verdeutlicht auch die Möglichkeiten der Kontrolle gesteuerter Beprobungen von Blasenfahnen unter mithilfe dieser Darstellung.

#### 4. die Entwicklung und Generalisierung von komplexeren Survey-orientierten Prozessketten (Offline)

Die Überführung der Daten in GWC erlaubt ein sogenanntes downsampling, bei dem nur ein Bruchteil der Daten konvertiert wird. Für eine schnelle Analyse der Daten in Hinblick auf Gasfahnen ist diese Datenreduktion häufig von entscheidendem Vorteil, denn Gasfahnen mit ihrer ausgedehnten Vertikalerstreckung können sehr deutlich auch in reduzierten Datenvolumina identifiziert werden. Ist ein Objekt in dem reduzierten Datensatz als solches erkannt, so erfolgt des Weiteren eine Schwellwertfilterung im voll aufgelösten Datensatz und anschließend eine Datendarstellung oder der Datenexport einer 3D Punktwolke für weitere Analysen (Abb. 5).

### Ablaufdiagramm surveyorientierter Prozessketten

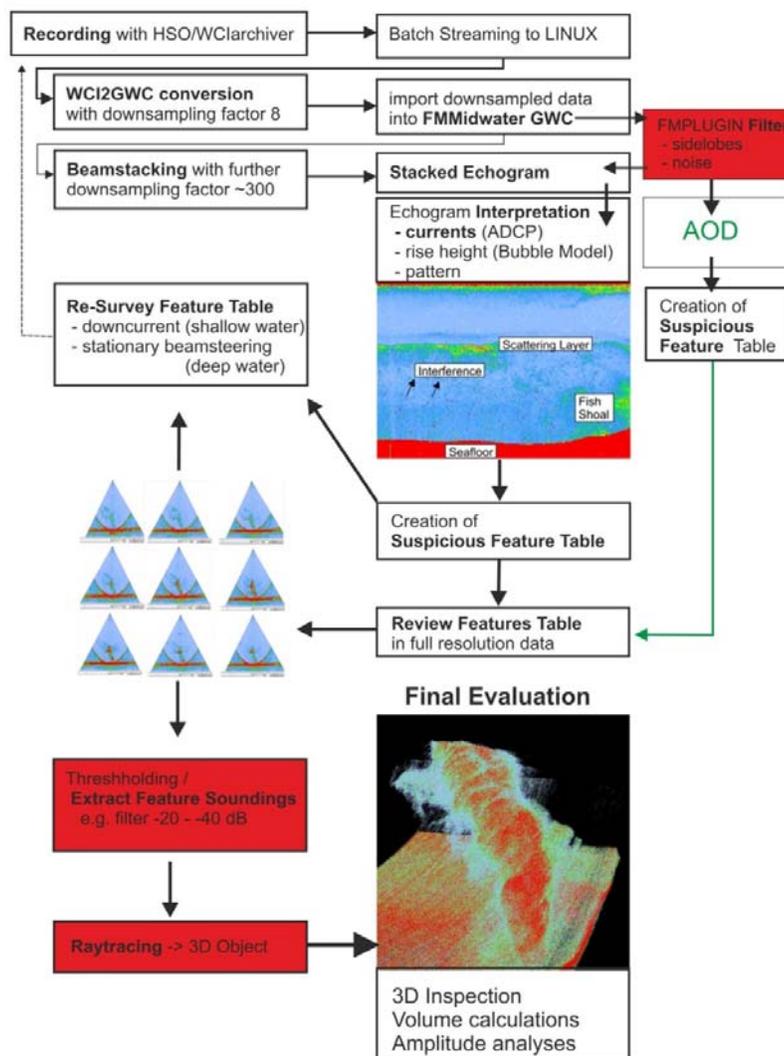


Abb. 5: Schematisches Ablaufdiagramm der Datenbearbeitung von Multibeam WCI Daten.

5. die Entwicklung neuer Erkennungsverfahren durch Volumenbetrachtung mit Objektverfolgung sowie Identifizierung der Bewegungsrichtung und Aufstiegs­geschwindigkeit von Gasblasen/Gasfahnen (Vektorbestimmung, Berücksichtigung des lateralen Versatzes durch Strömungsdrift etc.)

Zusätzlich zu den mit der ELAC SB3050 ermittelten Datensätzen (Schneider von Deimling und Papenberg, 2012) wurde in 2011 ein Datensatz von natürlichen Gasaustritten vulkanischen Ursprungs (Panarea, Italien) ausgewertet (Schneider von Deimling und Weinrebe, 2014). Hierbei handelte es sich um 200-400 kHz Daten einer R2Sonic Anlage mit einer sehr kurzen Pulslänge und dementsprechend guter vertikaler Auflösung im Zentimeterbereich (1.5cm -3cm). Es hat sich gezeigt, dass sich somit der Aufstieg von einzelnen Gasblasen bzw. Gruppen von Gasblasen im Nahbereich des Sonars auflösen lässt (Abb. 6, CO<sub>2</sub> chains). Treten die Gasblasen dichter gepackt auf, so können einzelne Gasblasen akustisch nicht mehr unterschieden werden. Der Zusammenhang zwischen lateraler Strömung und Gasblasenversatz (Vektorbestimmung) wird benutzt, um eine eindeutige Identifizierung von aufsteigenden Gasblasen gegenüber z.B. Fischen in der Wassersäule zu realisieren und deren Aufstiegs­geschwindigkeit zu messen (Abb. 6, rechts).

Um die Algorithmen zu realisieren wurde im Dezember 2012 ein Workshop unter anderem zur Plugin Programmierung der Visualisierungssoftware Fledermaus am GEOMAR abgehalten. Die Software Fledermaus der Firma QPS hat sich innerhalb der letzten zwei Jahre zum defacto Standard für die Bearbeitung von Multibeam-Wassersäulendaten entwickelt. Algorithmen und allgemeine Prozessroutinen für die Bearbeitung von WCI-Daten können nun als Plugin programmiert und in Fledermaus benutzt werden. Erste Plugins wurden während des Workshops bereits programmiert.

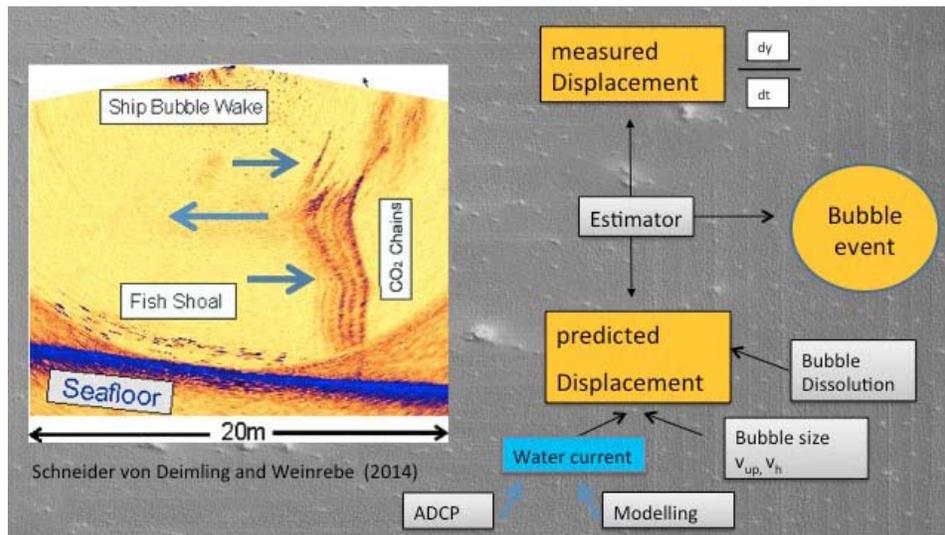


Abbildung 6: Darstellung des Einflusses von Strömungen auf den Aufstiegs­weg von Gasblasen und dessen Berücksichtigung im Detektionsverfahren von Blasenströmen.

6. die Erarbeitung von allgemeinen Prozessroutinen für die generelle Bearbeitung von WCI-Daten

Die Adaption der Particle Imaging Velocimetry (PIV) aus der Fluid-Dynamik erlaubt es einzelne Blasen oder Blasenpakete in den WCI Aufnahmen der Multibeamdaten zu verfolgen. Zu diesem Zweck werden die WCI Daten in eine dreidimensional Matrix überführt (Abb. 7, links). Über die Verfolgung der Bewegungen innerhalb dieses Rasters kann

zunehmend die Vektorisierung der Blasen erfolgen und eine Bestimmung von Richtung und Geschwindigkeit erfolgen (Abb. 7, rechts).

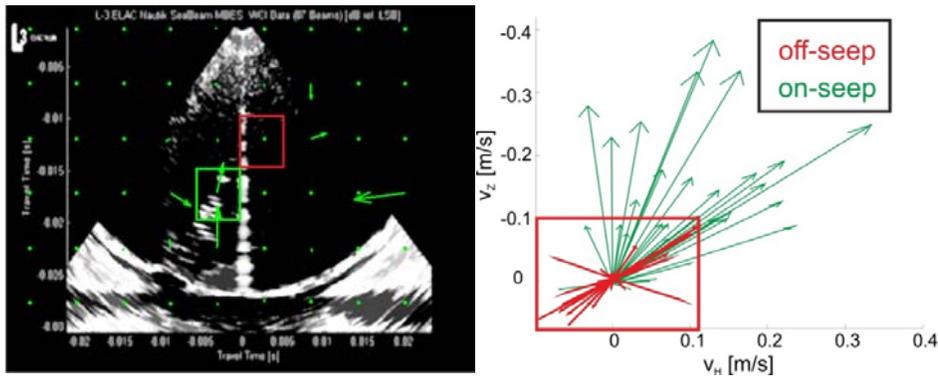


Abbildung 7: Darstellung der Vektorisierung von Blasenströmen aus den WCI Daten von Multibeamsystemen. Links: Einteilung der WCI Messdaten in eine räumliche Matrix. Rechts: Auswertung der WCI Matrix mit Vektorbestimmung in Raum und Geschwindigkeit (Schneider von Deimling und Papenberg, 2012)

7. die Entwicklung einer Gasaustrittsstelle zur Eichung des akustischen Systems und zur Sensitivitätsanalyse mittels künstlich erzeugten Gasblasenaustritts und dem Einsatz von Referenz Rückstreukörpern (Kalibrationskugeln)

In Kooperation mit Dr. Leifer, University of California, Santa Barbara, wurden numerische Simulationen durchgeführt, um das Lösungsverhalten von CO<sub>2</sub> Gasaustritten vorherzusagen. Demnach hätten sich die zu erwartenden CO<sub>2</sub> Gasblasen mit typischer Größe von 3-6 mm Durchmesser vor Panarea nach wenigen Metern Aufstieg vollständig im Seewasser auflösen sollen. Hydroakustische Messungen z.B. im Arbeitsgebiet belegen jedoch, dass zumindest ein Teil der Gasblasen bis zu 80m hoch aufsteigen (MicGinnis et al., 2011). Diese Ergebnisse konnten während der Forschungsreise POS469 2014 verifiziert werden. Da die hydroakustische Detektion mittels Fächerlot bzw. die Eindeutigkeit von Gasfahnen-Datenmustern zu einem gewissen Mass mit der Aufstiegshöhe korrelieren, stärken unsere Daten über erhöhte Aufstiegspotentiale die Position von schiffsbasierten Fächerlot-messungen in Hinblick auf Detektion von CO<sub>2</sub> Gasleckagen. Gründe für das erhöhte Aufstiegspotenzial könnten ungewöhnlich große Gasblasen sein, oder die Verbindung mit Plume-Upwelling Prozessen die den Auflösungstendenzen entgegenwirken können. Um dies zu untersuchen wurde die sogenannte Bubble-Box (Abb. 8) entwickelt.

Die Bubble-Box ermöglicht mit stereographisch-optischen Methoden die exakte Bestimmung der Gasblasengröße, die Visualisierung von Plume-Prozessen, und die Bestimmung von Gasflußraten und Blasenauftiegs-geschwindigkeit. Erste in situ Ergebnisse vor Panarea (Abb. 8) zeigen sowohl das Auftreten von sehr großen Gasblasen (>1cm) als auch erhöhte Aufstiegsgeschwindigkeiten (Plume Prozesse). Inwiefern diese Prozesse für ein erhöhtes Aufstiegspotential verantwortlich sind ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Für die Expedition AL-447 im November 2014 konnte die Bubble Box in ein sogenanntes Elevator-Trägergestell integriert werden (Abb. 9a). Elevator-Systeme werden zusammen mit ROV eingesetzt, um größere Nutzfrachten zum Meeresboden zu bringen, ohne jeweils den Tauchgang unterbrechen zu müssen. Damit ist die Einsatzflexibilität der BubbleBox weiter verbessert worden. Erste Analysen zeigen die einwandfreie Funktion der künstlich erzeugten Gasblasen (Abb. 9b). Während der Reise AL-447 konnte ein realistisches Abbild natürlicher Gasquellen simuliert und deren hydroakustische Rückstreustärke mit einem kalibrierten EK60 Fischereiecholot aufgezeichnet werden (Abb. 9c).

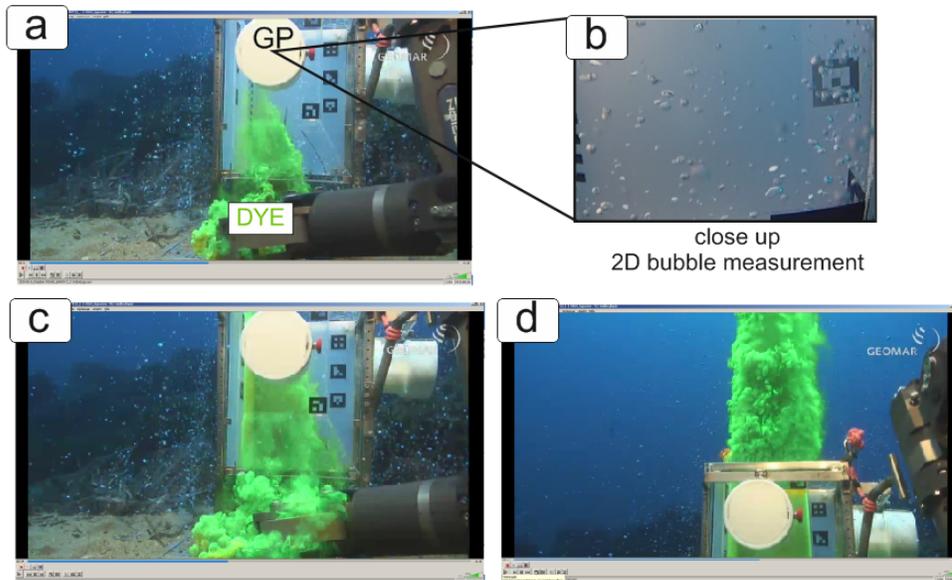


Abbildung 8: Photographien der Bubble Box zur Erzeugung künstlicher Gasblasen in der Wassersäule. (a, c, d) Photographien des eingefärbten Blasenstromes; (b) Detailaufnahme des Blasenstromes, in dem einzelne Blasen zu erkennen sind und größenabhängige Untersuchungen zulassen.

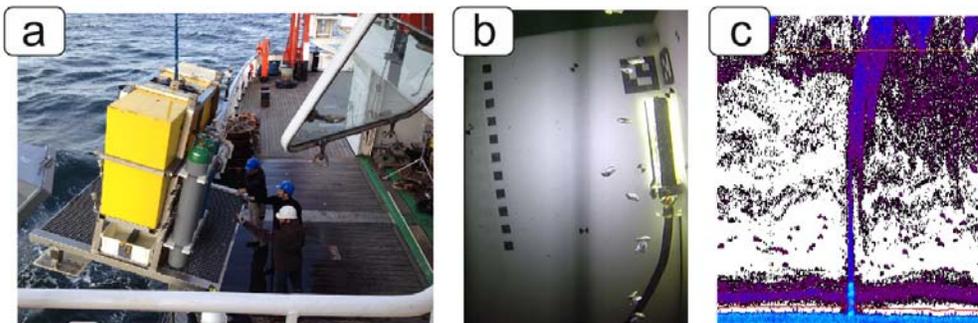


Abb. 9: (a) Einsatz des Gasblasenfreisetzungsmoduls und der B-Box dank des Elevator-Trägergestells während der Ausfahrt ALKOR 447; (b) in situ Aufnahme der künstlich erzeugten Gasblasenasutritte aufgenommen mit der Bubble-Box; (c) akustisches Abbild der Wassersäule (14 m) und der künstlich erzeugten Gasfahne mittels EK60 38 kHz.

#### A2-2:

Mit der vom Mittelgeber bewilligten Umstellung des Teilprojektes A2-2 wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Dem Projektpartner TEEC wurden zunächst Ausschnitte aus der 3D Vermessung des Projektes SO-214 NEMESYS am Hikurangi Margin vor Neuseeland zur Verfügung gestellt. Dieser Datensatz wurde zur Untersuchung von aktiven Cold Seeps (Austrittsstellen von Methangasblasen) vermessen und zeichnet sich durch eine Vielzahl von sogenannten Pipestrukturen (vertikalen Förderschloten) aus. Die Reflexionssignale bilden damit eine sehr komplexe Untergrundgeometrie ab, die hohe Anforderungen an die Detektionsroutinen des Deghosting stellen. Anhand dieser Daten konnte die Entwicklung des Deghosting Verfahrens

umgesetzt werden. Diese Testdaten wurden später um die kompletten Datensätze der 3D Fläche aus den Experimenten SO-214 und MSM34 erweitert. Der Datensatz der Expedition MSM34 aus dem Donau Delta zeichnet sich durch söhlige aber vielschichtig verteilte Sedimenthorizonte aus. Die Verifizierung der Funktionalität des Deghosting konnte damit an zwei unabhängigen Datensätzen erfolgen.

Die Analyse hochauflösender OBS Daten erfordert insbesondere in Verbindung mit 3D Aufnahmegeometrien ein besonders hohes Genauigkeitsmaß in der Repositionierung der Gerätestation am Meeresboden. Erste Erfahrungen hierzu konnten mit einem früher vermessenen Pseudo-3D Datensatz der Expedition M52 über einen Schlammvulkan gemacht werden. Anpassungen in der Skalierung der Modellierungssoftware und Ansätze zur räumlichen Repositionierung haben es ermöglicht die Imageabbildungen der OBS Daten mit der Reflexionsseismik abzugleichen (Abb. 10). Anstelle der Ersteinsätze ist die Prozessingsequenz soweit modifiziert worden, dass nunmehr das Signal der Meeresbodenmultiplen verwendet wird. Dadurch wird es ermöglicht mit den OBS einen erheblich erweiterten Untergrundbereich zu beleuchten und eine wechselseitige Überlappung der Geräteaufnahmen zu erreichen. Dieses Verfahren liefert über die Anpassung der erforderlichen Geschwindigkeitstiefenfunktion für die Migration der Daten bereits auf diesem Weg ein erstes P-Wellen Geschwindigkeitsmodell. Zusätzlich gewinnt die aus OBS und Streamerdaten zusammengesetzte seismische Abbildung durch ergänzende Reflexionen der OBS in Bereichen, in denen durch zu starke Streuung die Steilwinkelreflexionen des Streamer keine eindeutigen Signale (blanking) zeigen.

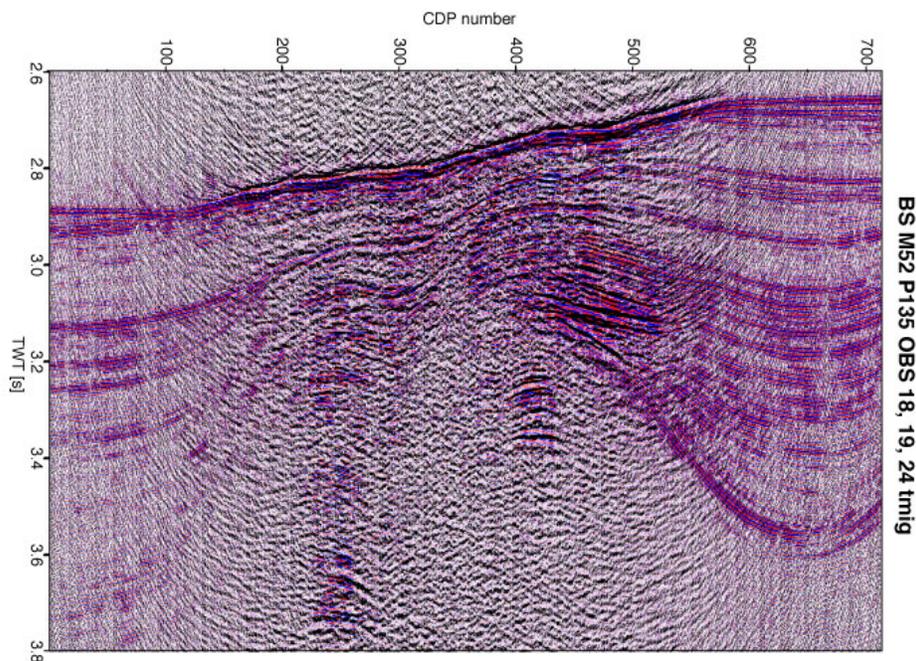


Abbildung 10: Kombinierte Seismogrammsection der Expedition M52 mit Überlagerung der Reflexionsseismik (rot) durch die Migration der Multiplen des simultan aufgezeichneten OBS (schwarz). Gut erkennbar ist der Informationsgewinn durch die ergänzenden Reflexionen in den akustisch turbulenten Bereichen (blanking) der Reflexionsseismik.

Für die weitere Entwicklung von Prozessketten für die routinemäßige Bearbeitung von vier Komponenten OBS Daten war ein echter 3D Datensatz der Expedition SO-226 CHRIMP vorgesehen. Während dieser Expedition konnten erstmals OBS in einem flächigen Netzwerk

parallel zur 3D Vermessung ausgebracht werden. Leider wurde das erwartete Gashydratsystem in Verbindung mit Mega-Depressionen im Meeresboden (vermutete Mega-Pockmarks) nicht bestätigt. Dennoch konnte der Datensatz für die Entwicklung der Prozessketten genutzt werden. Aufbauend auf den Schritten zur verbesserten Positionierung von 3D OBS Daten sind die Horizontalkomponenten der Seismometer bearbeitet worden. Bei industriellen Vermessungen werden OBS Knoten mit ROV abgesetzt, so dass ein kontrolliertes Ausrichten des Seismometers erfolgen kann. Dies ist bei der kostengünstigen Installation akademischer OBS Geräte am Meeresboden durch die Freifallmode nicht gegeben, ebensowenig sind kostspielige Neigungsmesser oder Kompanden im System integriert. Vor einer Analyse auf konvertierte Scherwellen ist daher eine Berechnung der Rotationswinkel für die vertikale und horizontalen Komponente(n) notwendig. Anschließend kann ein Modell der  $V_p$  Geschwindigkeiten (Kompressionswellen aufgenommen mit Hydrophon oder Vertikalkomponente) auf mögliche Konversionshorizonte für Scherwellen ( $V_s$ ) untersucht werden. In Abbildung 11 (links) sind diese Einsätze mit ihren Pendants auf der radialen Horizontalkomponente (rechts) gegenübergestellt. Mit diesen Analysesequenzen stehen nun für die dritte SUGAR Phase die notwendigen Routinen für eine Auswertung der OBS an der geplanten Testlokation zur Verfügung.

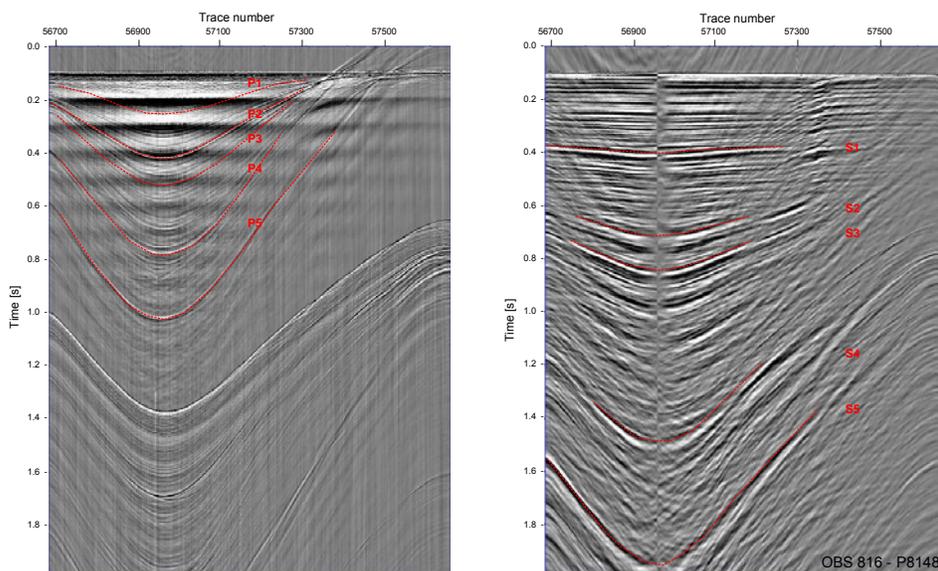


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Kompressionswelleneinsätze ( $V_p$ , links) und der Einsätze konvertierter Scherwellen ( $V_s$ ) auf der Radialkomponente (rechts) des Seismometers. Auffällig ist der typische Phasenwechsel in der radialen Horizontalkomponente mit dem Überfahren der Geräte-lokation (rechts, Trace number 56950). Die späteren Einsatzzeiten der Scherwellen ergeben sich aus der deutlich verringerten Schallgeschwindigkeit für  $V_s$ .

Eine notwendige Voraussetzung für die Produktion von Methangas aus Hydraten ist die Einlagerung derselben in eine permeable Sedimentmatrix, die zur Sicherung von unkontrolliertem Austritt gelöster Gase durch eine tonige Deckschicht abgesichert sein sollte. Da Tonminerale gerichtete Ablagerungseigenschaften haben, können Untersuchungen auf Anisotropie hier Hinweise auf entsprechende Materialeigenschaften der Sedimente liefern. Durch die parallele Aufzeichnung der Schallsignale der 3D Reflexionsseismik mittels der OBS stehen nun auch entsprechende azimutale Datensätze von den ausgebrachten Geräten zur Verfügung. Nach sorgfältiger Repositionierung kann aus dem 3D Datenvolumen ein entsprechender  $360^\circ$  beleuchtender azimutaler Datensatz generiert werden. Auch hier

wurden die 3D OBS Aufnahmen der Expedition SO-226 CHRIMP vom Chatham Rise vor Neuseeland genutzt (Abb. 11), um die Prozesskette zu erstellen und ein exemplarisches Bearbeitungsbeispiel zu gewinnen (Abb. 12).

Das Arbeitsgebiet zeichnet sich durch ausgeprägte topographische Depressionen am Meeresboden aus. Die darunter liegenden Sedimenthorizonte sind von Reflexionshorizonten mit stark wechselnden Amplituden gekennzeichnet, die sich im azimutalen Seismogramm widerspiegeln. Eine Anisotropie würde durch einen symmetrischen Wechsel der Amplitudenstärke und zeitliche Variation des Reflektors abgebildet.

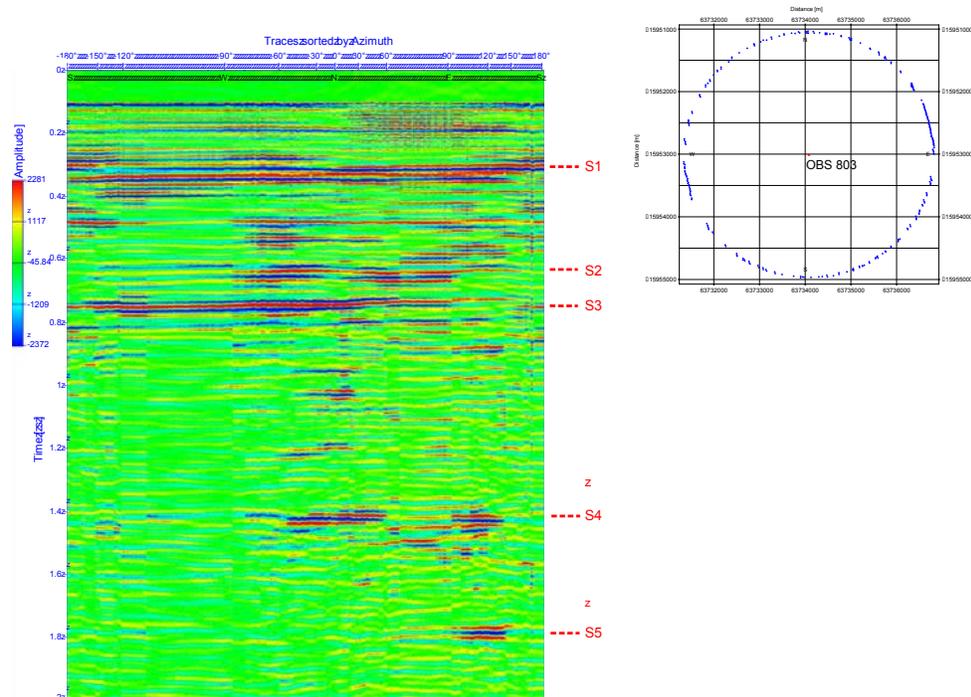


Abbildung 12: Azimutale Darstellung einer 360° Beobachtung der Radialkomponente (Vs) des OBS 803 der Expedition SO-226 CHRIMP. Links im Seismogramm angezeigt sind die Sedimenthorizonte aus Abb. 11; rechts ist die azimutale Überdeckung der dargestellten Seismogrammspuren gezeigt.

In dem Arbeitsgebiet der Expedition SO-226 CHRIMP wurde zunächst ein Gashydratsystem als Verursacher der großen Meeresbodendepressionen (möglichen Pockmarks) vermutet. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Dennoch eignet sich der Datensatz durch die lateral stark heterogen ausgebildeten Amplitudenvariationen der Sedimenthorizonte für eine exemplarische Entwicklung und Darstellung der Prozesskette zur Untersuchung von Anisotropie in OBS Daten. Nach der Aufbereitung der Navigationsdaten, der Repositionierung der Geräte am Meeresboden und der Rotation der Seismometerkomponenten wurden aus dem geschlossenen Feld der seismischen Signale für die 3D Vermessung für die OBS azimutal verteilte seismische Spurensätze extrahiert (Abb. 12 rechts). In der azimutal abgewickelten Darstellung eines entsprechenden Seismogramms wären anisotrope Sedimentlagen durch symmetrische Amplitudenanomalien erkennbar. In dem gezeigten Beispiel des OBS 803 sind die in Abbildung 11 gekennzeichneten Reflexionshorizonte der Radialkomponente (Vs) markiert. Bis zum Horizont S3 zeichnen sich die Reflexionen durch eine über den Kreis ausgeglichene

Amplitudenverteilung aus. Im Nordosten von OBS 803 unterhalb von S3 wurde ein Schlamm diapir interpretiert, der kleinräumig strukturelle Anomalien in den Seismogrammen verursacht. Die Abweichungen von einer söligen Lagerung führen dabei zu Abweichungen von der symmetrischen Fortsetzung des Wellenfeldes im Untergrund. Wechselnde Amplitudenstärken der Horizonte S4, S5 und der dazwischen liegenden Reflexionen bilden diese laterale Variation der Reflexionen ab.

Von Sommer 2013 bis Projektende stand die Vorbereitung, Durchführung und erste Nachbereitung der Expedition MSM34 zum Donau Delta im Schwarzen Meer im Fokus der Projektarbeiten von TP A2-2 Ziel der Expedition war es eine mögliche Lokation für eine Testbohrung zur Felderprobung der SUGAR-Technologie zu finden. Daher bestand die Aufgabe in der Auffindung sandiger Sedimente mit Indizien für eine Hydrateinlagerung. Am höffigsten wurden hierzu die verschütteten, alten Channelsysteme des Donau Deltas angesehen. Seismische Daten aus dem Untersuchungsgebiet sind nur bei Explorationsfirmen verfügbar und nicht öffentlich zugänglich. Für einen ersten Überblick wurde daher auf die Publikationen von Popescu et al. (2006 & 2007), sowie eine Diplomarbeit von Baristeas (2006) zurückgegriffen. Ergänzt wurden die Informationen durch Berichte der EU Projekte BLASON und ASSEMBLAGE. Ziel war es, mögliche Lokationen für Gashydrat führende Schichten in sandigen Sedimenten zu finden, die bei einer Tiefe von bis zu 200 m unter dem Meeresboden für das mobile Bohrgerät MeBo noch erreichbar sind. Für diese Zwecke wurde mit den Kollegen der Geochemie (TP B2) ein Informationskatalog mit Angaben zu Hangneigungen, BSR Tiefen, Meeresströmungen, Stratigraphien und Gesteinsparametern erarbeitet und dem TP B3 für eine Bohrprojektierung zur Verfügung gestellt. Mit Erarbeitung dieses Datenkatalogs hat sich gezeigt, dass die am vielversprechendsten, verschütteten Channelsysteme nicht durch frei verfügbare Daten abgedeckt sind. Aus diesem Grunde musste in einem ersten Fahrtabschnitt eine regionale seismische Vorerkundung der Palaeo-Channel erfolgen (Abb. 13).

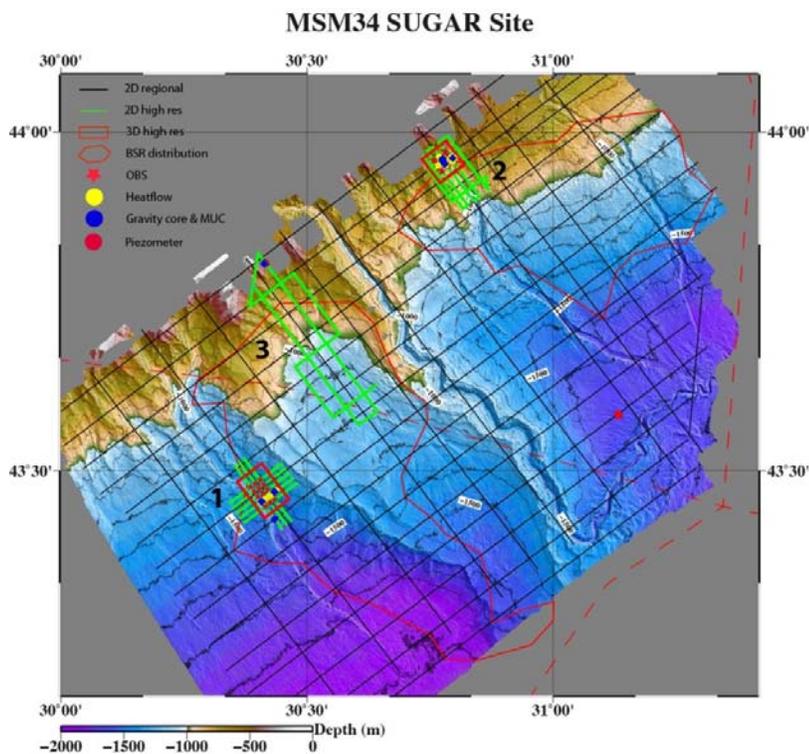


Abbildung 13: Übersichtskarte des Arbeitsgebietes im Donau Delta und der untersuchten Palaeo-Channel Systeme. Die regionalen seismischen Profile zur Vorerkundung sind schwarz gekennzeichnet. Die Ziffern 1 bis 3 markieren die drei für hoch auflösende Detailstudien gewählten Abschnitte. Rote Rechtecke bezeichnen die 3D P-Cable Flächen. Grüne Profillinien wurden mit hochauflösender 2D Seismik vermessen.

Anhand der an Bord vorbereiteten Rohstapelungen (Brute Stack) der regionalen Seismik wurden die weiteren Arbeitsgebiete für die hoch auflösenden Detailstudien ausgewählt (Abb. 13). Randbedingungen für einen Feldtest der SUGAR Technologien ist ein BSR Vorkommen in sandiger Sedimentmatrix, das keine natürlichen Leckagen aufweist und innerhalb der Bohrtiefe des MeBo-200 (200 m) liegt. Als einzige geeignete Stelle wurde der als Gebiet 1 markierte Abschnitt eines Paleao-Canyons identifiziert. Aus der vorläufigen Kartierung des BSR in den regionalen Seismikdaten ist im Arbeitsgebiet 2 ein ungewöhnliches Auskeilen des BSR zu erkennen. Dieser Abschnitt wurde für Studien zur Hydratstabilität ausgewählt. Das Arbeitsgebiet 3 kreuzt einen verschütteten Canyon, in dessen Grabensystem Anzeichen für kleinskalige Rutschungen der Verfüllung gefunden wurden. Allen Gebieten gemeinsam sind, neben der Existenz eines BSR, weitere unregelmäßig verteilte, invertierte Reflexionseinsätze auch oberhalb des BSR, die als Anzeichen für freies Gas innerhalb der Hydratstabilität interpretiert werden und auf eine Hydratbildung auch dicht unter dem Meeresboden deuten.

Das Arbeitsgebiet 1 überdeckt einen verschütteten Canyon, der auf erste Sicht mindestens zu drei unterschiedlichen Zeiträumen aktiv gewesen ist (Abb. 14). Die seismischen Sektionen zeigen einen mehrfachen BSR, der als sicheres Anzeichen für das Vorhandensein von freiem Gas und der Hydratbildung gewertet wird. Invertierte Reflexionen innerhalb der Hydratstabilitätszone sprechen für die lokale Verfügbarkeit von freiem Gas bis hin zum Meeresboden. Daher ist auch mit einer Hydratbildung bis zum Meeresboden zu rechnen. Ein solcher Reflektor bei Offset 4500 (Abb. 14) und ca. 2180 ms Zweiweglaufzeit ist daher als Referenz für eine Testbohrung mit MeBo ausgewählt worden. Während der seismischen 3D P-Cable Vermessung wurden Wassersäulendaten mit Fächerecholot und Parasound aufgenommen, um durch mögliche Gasblasen natürliche Leckagen in diesem Gebiet zu kartieren. Weder aus diesen Messungen, noch aus der geochemischen Analyse von Bodenproben (Abb. 14, GC3 & GC4) oder den Wärmestrommessungen (Abb. 14, HF2-1 bis HF2-10), sind Anzeichen für erhöhte Methankonzentrationen oder Fluidaustritte gefunden worden. Daher kann hier von einem abgedichteten Hydratsystem ausgegangen werden, womit eine der Sicherheitsbedingungen für die Testbohrung gegeben ist.

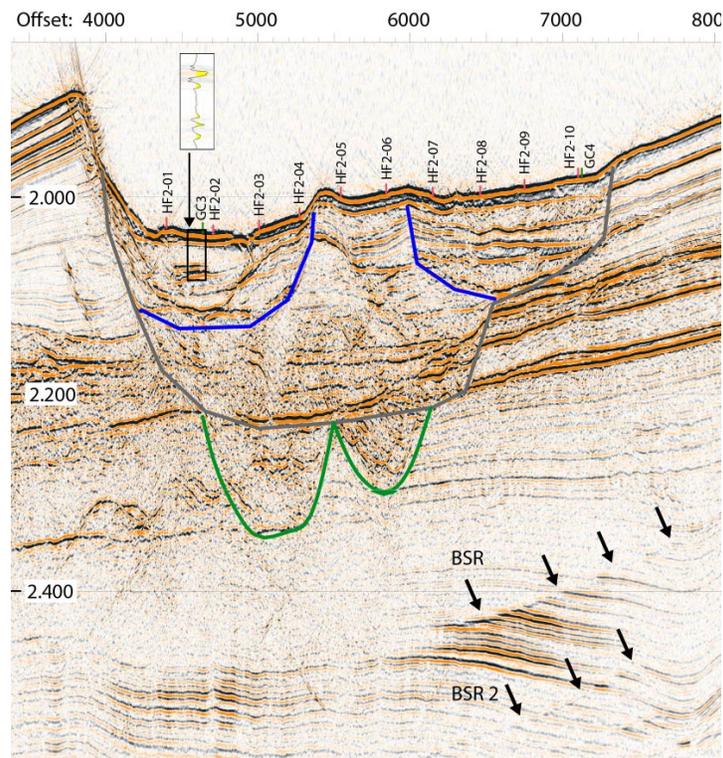


Abbildung 14: Querprofil durch das Arbeitsgebiet 1.

In grün, grau und blau ist die Basis von drei Canyon-Systemen umrissen, die zu unterschiedlichen Zeiträumen aktiv gewesen sind. Der für Methangas bestimmte BSR ist von weiteren BSR unterlegt, die nicht parallel zu ersterem verlaufen. Bei 4.500 m Offset ist die für MeBo geeignete Lokation mit dem Schwerelot GC3 gekennzeichnet. Der Bildeinsatz zeigt in ver-größerter Form die invertierte Amplitude des Zielreflektors.

Weitere, für MeBo erreichbare, Zielpunkte wurden in den regionalen 2D Seismikdaten nicht gefunden. Daher wurde für das zweite Arbeitsgebiet eine ungewöhnliche Aufwölbung des BSR im Bereich der Schelfkante des Donaudeltas ausgewählt (Abb. 13 & 15). Die Aufwölbung des BSR befindet sich direkt unterhalb einer Rutschung am Rande eines Canyon Systems. Anders als im Arbeitsgebiet 1 finden sich hier entlang der Abrisskante und im Zentrum der Rutschung aktive Austritte von Gasblasen (Abb. 16).

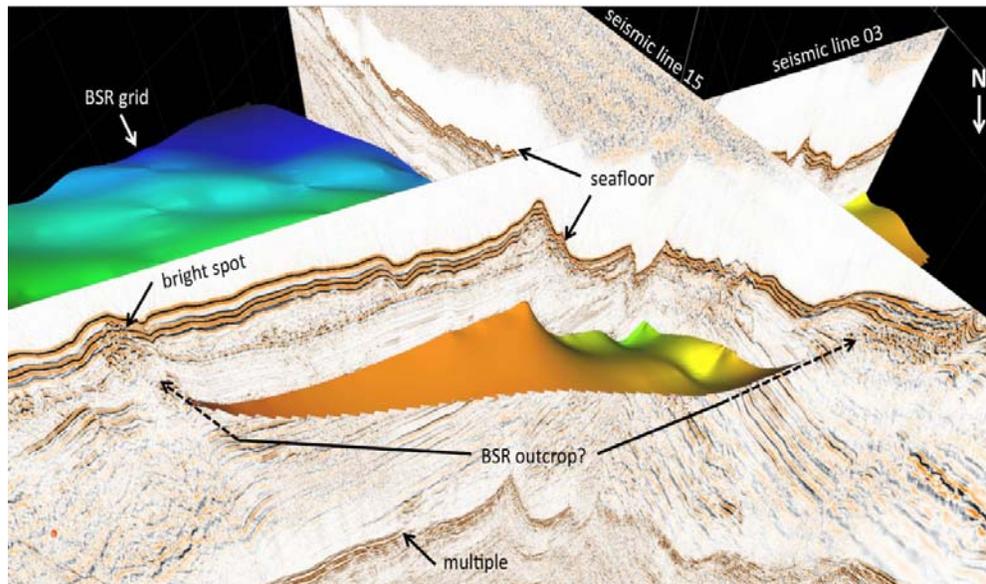


Abbildung 15: 3D Darstellung des unerwartet stark aufgewölbten BSR im Bereich der Schelfkante des Donau Deltas. Ein auskeilen des BSR bis zum Meeresboden (outcrop) ist in den vorläufigen Daten nicht eindeutig zu erkennen.

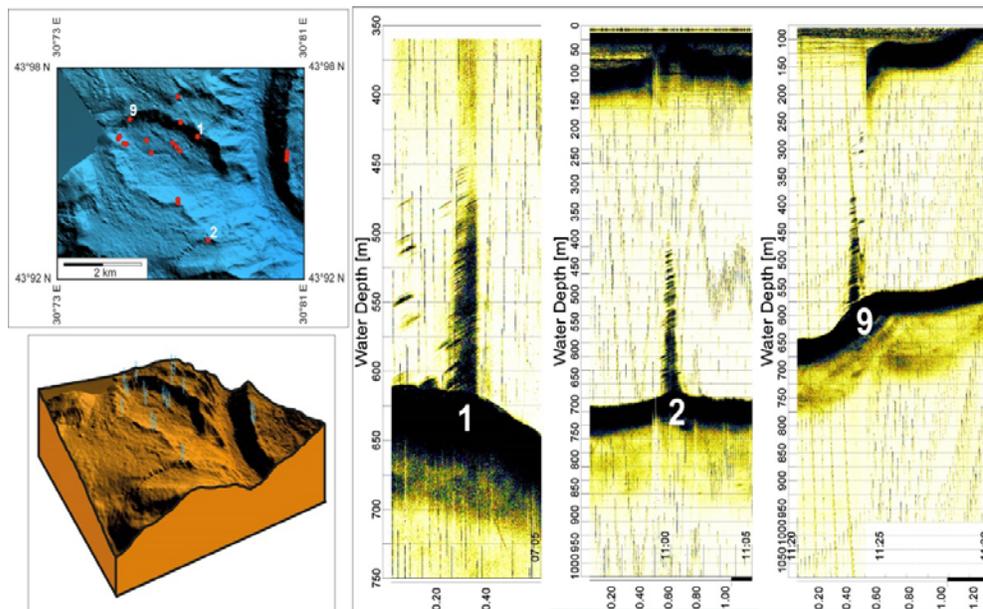


Abbildung 16: Übersicht über Gasflares, die im Arbeitsgebiet 2 entlang der Rutschung detektiert wurden. Links ist die Lokationskarte und eine 3D Darstellung der Aufstiegshöhe der Flares abgebildet. Rechts sind ausgewählte Beispiele der Parasound Vermessung der Flares abgebildet.

Messungen mit der Wärmestromlanze kreuzen die Rutschungsfläche und zeigen an der Flareposition 1 erhöhte Temperaturen. Ebenso zeigen die geochemischen Untersuchungen erhöhte Methankonzentrationen. Aus dem Zusammenspiel der akustischen Vermessungen (2D, 3D, OBS, Parasound), den Wärmestromdaten und den geologischen / geochemischen Proben wird eine Ursachenforschung dieser Anomalie im Verlauf des BSR möglich sein. Des Weiteren besteht die Möglichkeit Beiträge zum Zusammenhang von Hangstabilität und Gashydraten zu erarbeiten.

Durch gute Wetterbedingungen und erfolgreiche Profilarbeiten konnte zum Ende der Reise MSM34 ein drittes Arbeitsgebiet aufgesucht werden (Abb. 13). Hier handelt es sich um ein komplett verschüttetes Canyon System (Abb. 17), in dem Anzeichen für Rutschungen innerhalb des Canyons beobachtet wurden. Gleichzeitig sind Abschnitte verstärkter Amplituden zum Teil mit invertierter Phase zu erkennen, deren laterale Ausdehnung teilweise durch Brüche begrenzt wird. Analysen der hochauflösenden 2D Seismik können hier genutzt werden, um Anhaltspunkte für Migrationswege und Blockaden in der Ausbreitung freien Gases zu finden.

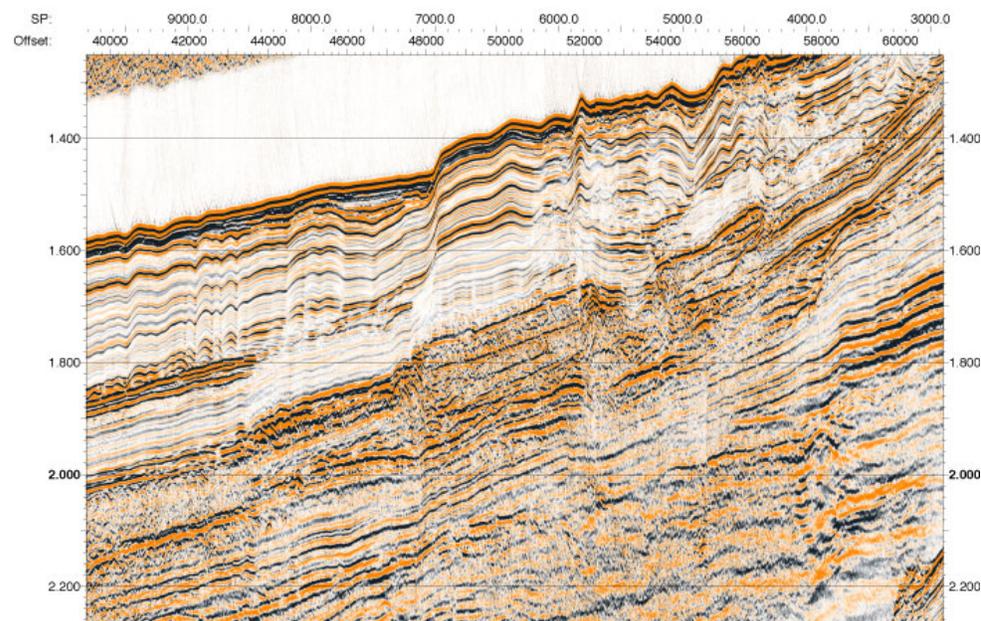


Abbildung 17: Ausschnitt aus dem Profil MSM34-18. Die Sektion zeigt Anzeichen für Rutschungsereignisse innerhalb der Canyonverfüllung. Zudem treten Abschnitte starker Amplituden (teilweise invertiert) auf, deren Begrenzung mit Bruchzonen einhergeht.

Im Anschluss an die Expedition MSM34 wurde die verbleibende Projektlaufzeit genutzt, um die Grundlagen zur Datenbearbeitung der zehn seismischen Datensätze zu legen. Dies beginnt mit der Aufarbeitung der Navigationsinformationen von Schallquelle und Empfängersystemen. Damit verbunden ist eine erste Analyse von Schallgeschwindigkeiten für ein Hintergrundmodell (Abb. 18), das später für die Migrationsverfahren weiter verfeinert wird. Die kleinskaligen Änderungen, die in einem Gashydratsystem erwartet werden bilden sich in dieser ersten Abschätzung von Variationen der Schallgeschwindigkeit im Sediment noch nicht aus.

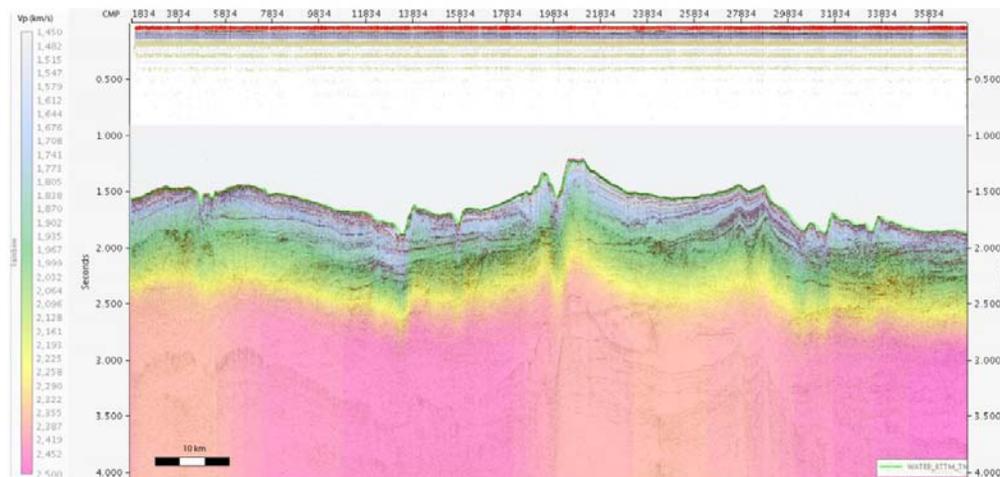


Abbildung 18: Seismogramm der 2D Linie MSM34-02 überlagert mit dem ersten Vp-Hintergrundmodell für die Ermittlung der Schallgeschwindigkeiten.

#### A2-5:

Die Grundlage der Ausbeutung von Methanhydratressourcen ist eine möglichst präzise Quantifizierung der Methanhydrate im Untergrund und die Bestimmung geeigneter Bohrlochlokationen. Bei der Beantragung des Teilprojektes A2-5 wurden drei Arbeitsschritte identifiziert, die zu einer besseren Methanhydratquantifizierung innerhalb einer Struktur anhand von elektromagnetischen und seismischen Explorationsdaten führen sollten:

- a. Die Entwicklung eines Auswertalgorithmus mit dem anhand einer Kombination von elektromagnetischen und seismischen Daten die Genauigkeit der Methanhydratquantifizierung erhöht werden kann.
- b. Akquise eines geeigneten Felddatensatz, an denen der theoretische Ansatz auf Funktionalität im Feld überprüft werden kann.
- c. Auswertung der elektromagnetischen Daten in Kombination mit vorhandenen seismischen Daten und Dokumentation, dass durch die kombinierte Analyse Methanhydratkonzentration im Zielgebiet besser bestimmt werden können.

Im Folgenden diskutieren wir im Einzelnen, wie wir diese Ziele erreicht haben.

##### a. Die Entwicklung eines Auswertalgorithmus

Die Entwicklung eines kombinierten Auswert-Algorithmus' erforderte die Untersuchung des komplementären Informationsgehaltes zwischen elektromagnetischen und seismischen Daten. Die anfängliche Untersuchung erfolgte anhand synthetischer Datensätze für Schichtmodelle mit Gashydraten und freiem Gas. Diese Modelle wurden in Teilprojekt A2-5 mit verschiedenen Ansätzen daraufhin untersucht, wie dieser komplementäre Informationsgehalt durch eine gemeinsame Inversion genutzt werden kann, um Dicke und Hydratsättigung der eingebetteten Hydratschicht zu bestimmen (Swidinsky et al., 2012 a,b,c). Ein Beispiel dieser Untersuchungen ist in Abbildung 19 dargestellt. Es zeigt, dass die Schnittmenge der Lösungsräume der Einzelinversionen, deutlich kleiner ist als die Inversion der einzelnen Datensätze.

Weiterhin wurden die in SUGAR I entwickelten neuartigen 3D tomographischen Daten modelliert. Dies erforderte die Entwicklung eines 3D CSEM Modellierungsalgorithmus, der einen Zusammenhang zwischen 3D elektrischen Widerstandsmodellen des Untergrundes

und den gemessenen 3D CSEM Daten herstellt. Da der ursprünglich avisierte Modellierungscode für das Projekt durch den Weggang von Frau Avdeeva nicht zur Verfügung stand, wurde hierfür ein am GEOMAR in den Grundzügen bestehender Code weiterentwickelt. Die interne Entwicklung hatte den Vorteil, dass die IPRs aus der Algorithmusentwicklung am GEOMAR verbleiben und der Code unseren industriellen Partnern zur Verfügung gestellt oder kommerzialisiert werden kann. Ein 3D Modellierungs- und Inversionscode gerade für marine Anwendungen in denen hohe Widerstandskontraste auftreten, ist auf dem offenen Markt nur schwer erhältlich.

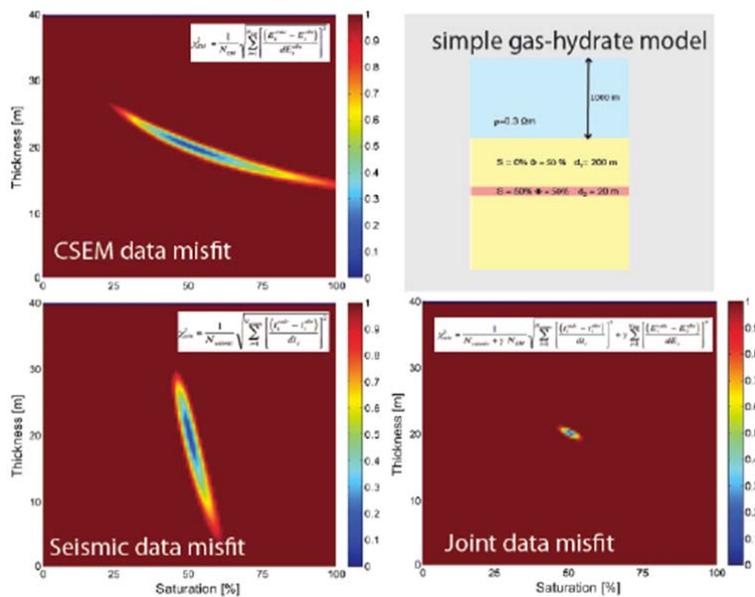


Abbildung 19: Synthetisches Beispiel für die Einschränkung des Lösungsraumes für Gas und Gashydratkonzentration und Verteilung mittels Joint-Inversion. Oben rechts: Einfaches geschichtetes Methanhydratmodell mit spezifizierter Schichtdicke und Hydratsättigung (Archies 1942 und Wyllie 1956) für welches ein synthetischer elektromagnetischer und seismischer Datensatz mit 5 % Rauschen generiert wurde; Oben links: Auflösung der Schichtdicke und Hydratsättigung durch Einzelinversion der elektromagnetischen Daten; Unten links: Auflösung der Schichtdicke und Hydratsättigung durch Einzelinversionen der seismischen Daten; Unten rechts: Auflösung der Schichtdicke und Hydratsättigung durch Joint-Inversion von elektromagnetischen und seismischen Daten.

Der Grund dafür ist, dass 3D CSEM Modellierungen und Inversionen technisch und numerisch äußerst anspruchsvoll sind und sich durch extrem hohe Rechenzeiten auszeichnen. Daher ist es zielführend solche Software mit neuester Hardware und neuesten mathematischen Methoden umzusetzen. Das gilt insbesondere für die Interpretation der in SUGAR II aufgenommenen Daten, welche die Berechnung vieler Transmitter- und Empfängerkonfigurationen in zwei Polarisationsrichtungen erforderte.

Auf der Hardwareseite wurde die Optimierung realisiert, indem unser Code für Graphical Processing Units (GPU) programmiert wurde (Sommer et al., 2013). GPUs sind massivparallele Recheneinheiten, die in erster Linie für Videospiele entwickelt wurden, sich aber auch seit neuestem in der Wissenschaft verbreiten, da sie eine kostengünstige Alternative zu Clustern und Supercomputern darstellen. Mathematisch wurde der Code auf Krylov-Verfahren ausgerichtet. Dabei werden Systemmatrizen, welche den Berechnungen zugrunde liegen, durch Transformationen in den Krylovraum verkleinert. Durch die daraus

entstehenden verkleinerten Matrizen kann die Rechenzeit erheblich gesenkt werden. Der entwickelte Code ist nun einer der weltweit schnellsten Codes (siehe Abb. 20) und wurde erfolgreich für die 3D Analyse der Daten eingesetzt.

Für die 3D Inversion sind aufgrund der starken nicht-Linearität des elektromagnetischen Problems, die in der Seismik üblichen Gradientenverfahren auszuschließen und die explizite Berechnung der Jakobimatrix, d.h. die Veränderung der Daten anhand der Veränderung eines Modellparameters, unvermeidbar. Aufgrund der Größe und der hohen Rechenzeit die für die Jakobimatrix benötigt wird, stellt sie die Kernherausforderung des gesamten Inversionsalgorithmus dar. Unser Algorithmus löst die o.g. Probleme zum einen durch die Reduzierung der Modellparameter durch Octree Meshes und zum anderen durch Kompression der Jakobimatrix durch Projektion in den rationalen Krylov Unterraum. Die hier beschriebene Berechnung der Jakobimatrix wurde in 3D implementiert und wird derzeit getestet sowie weiter numerisch optimiert. Ihre Einbindung in einen Gauss-Newton Optimierungsalgorithmus, sowie synthetische Tests sind zur Zeit noch in Arbeit.

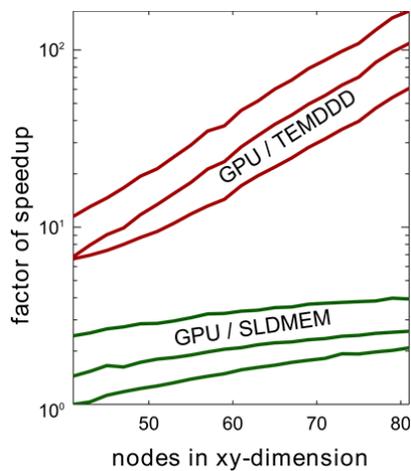


Abbildung 20: Beschleunigung des neuen GPU Codes (abgeändert aus Sommer et al., 2013) im Vergleich zum Originalcode TEMDDD (rot) und zu dem kommerziellen Code SLDMEM (grün).

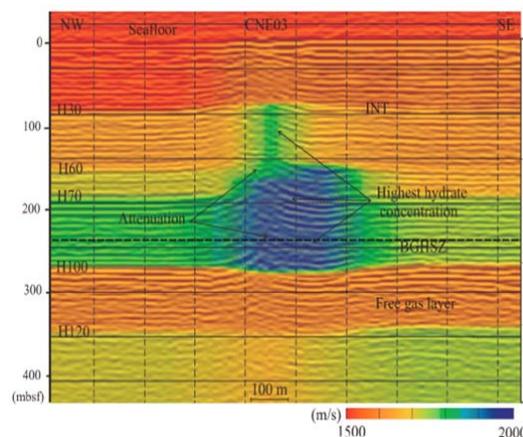
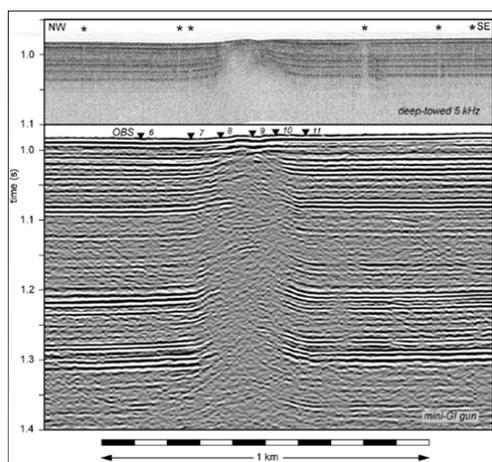


Abbildung 21: Seismische Reflexionsdaten (links) zeigen eine Fluidaufstiegsstruktur, die durch seismisches ‚Blanking‘ charakterisiert ist. Durch die Analyse von seismischen Reflexionsdaten konnte ein Geschwindigkeitsmodell des Untergrundes erstellt werden. Erhöhte Geschwindigkeiten (Grün- und Blautöne) zeigen die unterschiedlichen P-Wellen Geschwindigkeiten als Proxy für Konzentrationsunterschiede von Methanhydraten.

b. Elektromagnetische Datenakquise und Datenbearbeitung.

Hauptaufgabe der Teilprojektes A2-5 war die Akquise von elektromagnetischen Daten mit der in SUGAR I entwickelten Technologie im Nyegga Arbeitsgebiet. Für die Fluidaufstiegsstruktur lag eine kombinierte Auswertung von seismischen Reflexions- und Refraktionsdaten in Form eines Geschwindigkeitsmodell vor (Plaza-Faverola et al., 2010), welche die Existenz von Methanhydraten nachweist (siehe Abb. 21). Die Auslage des ausgeführten elektromagnetischen Experiments ist in Abbildung 22 dargestellt.

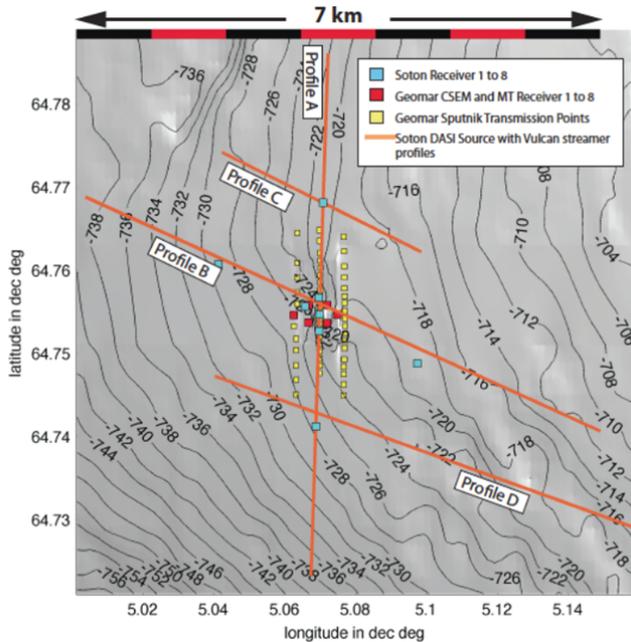


Abbildung 22: Auslage der elektromagnetischen Experimente im Nyegga Arbeitsgebiet. Die GEOMAR-Empfänger (rote Quadrate) wurden von verschiedenen Positionen mit der neuentwickelten GEOMAR-Quelle (gelbe Quadrate) in zwei Polarisationsrichtungen angestrahlt. Des Weiteren wurden Empfänger der University of Southampton (blaue Quadrate) ausgebracht und die geschleppte, einfach polarisierte Hochleistungsquelle DASI entlang von vier Profilen (orangene Linien) eingesetzt, deren Signale sowohl von den GEOMAR als auch von den University of Southampton Empfängern aufgezeichnet wurden. Ein in einer Entfernung von 300 m hinter DASI hergeschleppter Empfänger (VULCAN), erlaubte außerdem das Kartieren von oberflächennahen Widerstandsvariationen in den Sedimenten.

Abbildung 23 zeigt erste Ergebnisse der regionalen elektromagnetischen 2.5-D Dateninversion entlang des NS Profils A (siehe Abb. 22). Die Daten zeigen eine breite Widerstands anomalie im Zentrum, welche der Lage der Fluidaufstiegsstruktur entspricht. Des Weiteren ist ein erhöhter Widerstand unterhalb der Gashydratstabilitätszone (GHSZ) zu erkennen, der mit der Existenz von Gas in Verbindung gebracht wird. Gas wie auch Gashydrate erhöhen den elektrischen Widerstand, aber die seismischen Daten zeigen für diesen Tiefenbereich deutlich erniedrigte seismische Geschwindigkeiten.

Die Widerstandswerte der zentralen Anomalie bei den 2D Profilen liegen im Bereich von ca. 3 Ohm m. Da die Anomalie jedoch dreidimensional ist (siehe Abb. 24), die regionalen Tiefendaten aber nur entlang von 2D Profile aufgenommen und invertiert wurden, liegt der wahre Widerstandswert wahrscheinlich noch darüber. Eine genauere Bestimmung des Widerstands wird die noch durchzuführende 3D Inversion liefern.

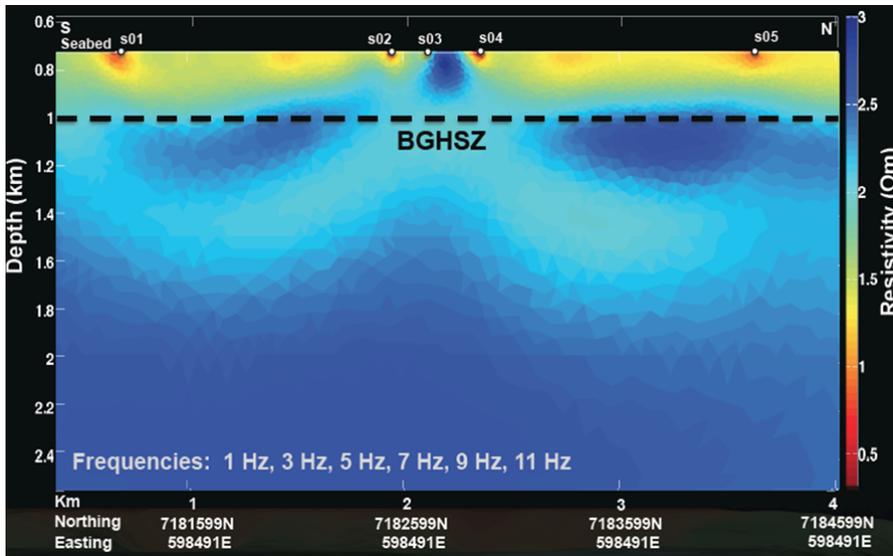


Figure 23: 2.5D Widerstandsmodell welche aus dem 2D regionalen NS Tiefenprofil der University of Southampton hergeleitet wurde (persönliche Kommunikation E. Attias, University of Southampton).

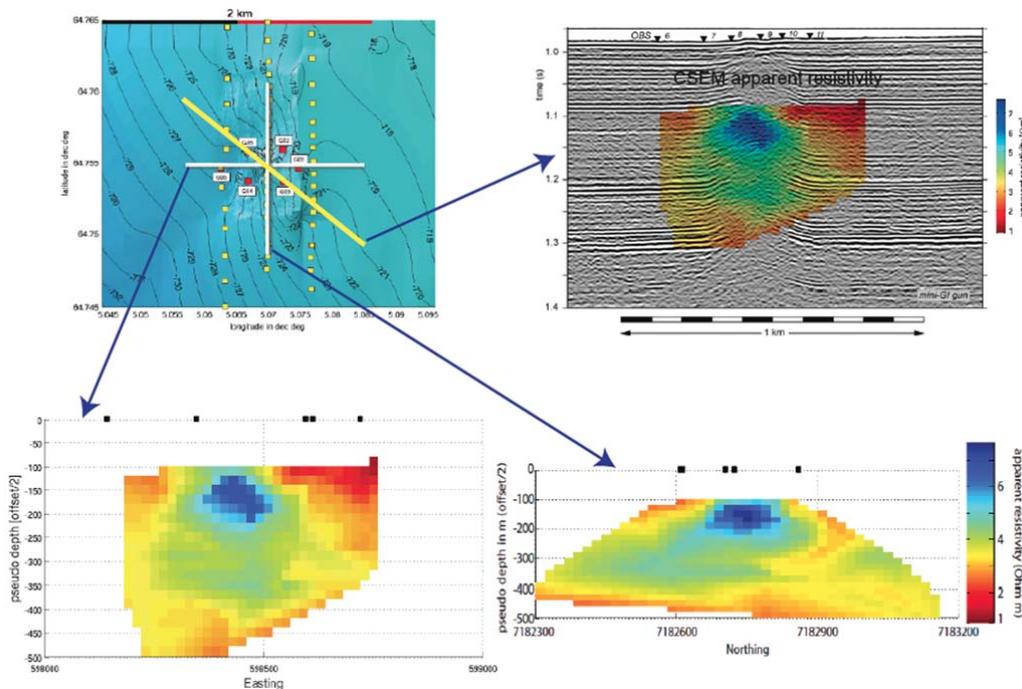


Abbildung 24: Aus den Rotationsinvarianten des 3D tomographischen CSEM Experiments hergeleitete scheinbare Widerstandverteilungen (oben links, rote Quadrate zeigen die Lage der Empfänger, gelbe Quadrate die Sendpositionen). Erhöhte Widerstände im Zentrum (Grün- und Blautöne) weisen auf die Existenz von Methanhydraten hin. Zu beachten ist, dass es sich bei den Tiefenangaben nicht um echte Tiefen sondern um Pseudotiefe, ähnlich der seismischen Zweiweglaufzeit handelt. Ein Schnitt durch den 3D Widerstandswürfel entlang einer seismischen Linie (obern rechts) zeigt eine ausgezeichnete räumliche Korrelation der Widerstandsanomalie mit der seismischen Anomalie (siehe Abbildung 3). EW und NS Profile (unten links und unten rechts) zeigen eine starke Anomalie mit Ausläufern in süd-östlicher Richtung.

Die 3D elektromagnetischen Daten, die in zwei Polarisationsrichtungen aufgezeichnet wurden, liefern viele zusätzliche Informationen. Zu ihrer Auswertung mussten allerdings neue Konzepte entwickelt werden, wie diese Daten gesamtheitlich verarbeitet werden können. Hierzu wurde ein methodischer Ansatz von Caldwell & Bibby für Landdaten weiterentwickelt, der ein konsistentes Imaging der aufgenommenen Daten im Rahmen von scheinbaren Widerständen ermöglicht. Der Ansatz beruht auf der Interpretation von Rotationsinvarianten der gemessenen Felder. Nach den entsprechenden Anpassungen zeigen die Modellierungen, dass sich der ursprüngliche Ansatz sinnvoll auf marine Datensätze anwenden lässt (Hölz et al., 2012). Aktuelle Weiterentwicklungen zeigen, dass sich mit Hilfe der Rotationsinvarianten ein robustes Verfahren zur Bestimmung scheinbarer Widerstände herleiten lässt, das zur schnellen Visualisierung der Daten geeignet ist (Swidinsky et al., 2013, Swidinsky et al., 2014). Scheinbare Widerstandsverteilungen, welche direkt aus den Daten ermittelt werden, stellen einen gemittelten Widerstand des Untergrunds dar, während für eine genaue räumliche Verteilung des wahren Widerstandes eine Inversion oder Modellierungsstudie notwendig ist. Das Verfahren wurde bisher erfolgreich auf einen bereits prozessierten Datensatz aus dem Westnildelta (Hölz et al., eingereicht) angewendet und nach der Vorprozessierung der Nyegga-Daten für diesen Datensatz benutzt. Die aus den Daten hergeleitete scheinbare Widerstandsverteilung in 3D weist eine ausgeprägte Anomalie im Zentrum auf, welche in der selben Region liegt, in der seismische Anomalien beobachtet wurden (siehe Abb. 24).

Zunächst wurde in Teilprojekt A2-5 eine 1D Inversion der Rotationsinvarianten entwickelt und angewendet, um einen Überblick über die wirklich Tiefe und Größe der Widerstands-anomalie zu bekommen. Abbildung 25 zeigt das daraus resultierende Model, welches sich räumlich durch eine aufwölbende Widerstands-anomalie auszeichnet. Da jedoch die Daten einen ausgeprägten 3D Charakter zeigen, ist anzunehmen, dass das Model durch die nichtbeachteten 3D Effekte verfälscht ist und kann deshalb nicht dazu benutzt werden, genaue Methanhydratkonzentrationen anhand der hergeleiteten Widerstände zu bestimmen.

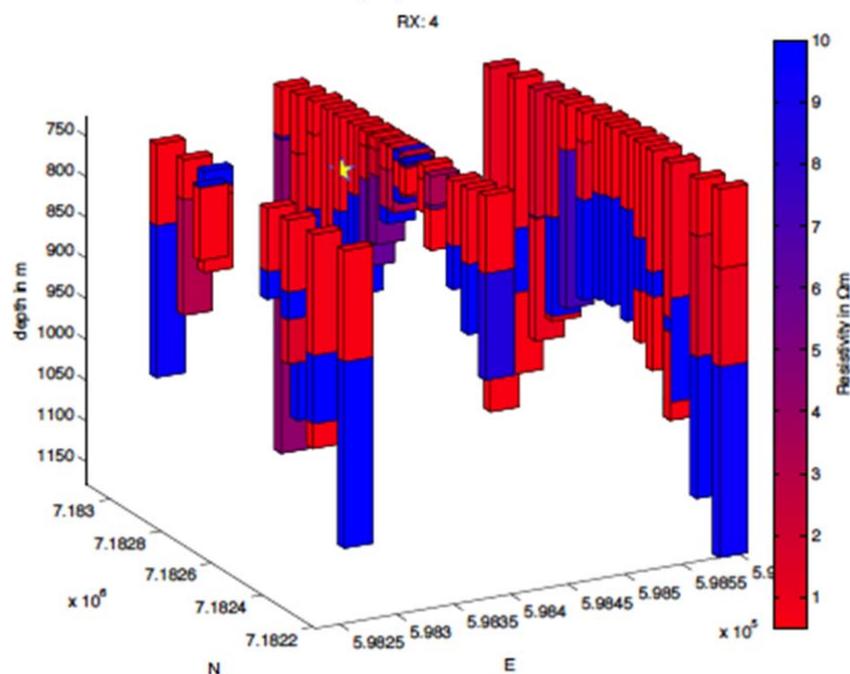


Abbildung 25: Resultate einer 1D Inversion der von Empfänger 4 aufgezeichneten Daten aller Senderstationen. Verschiedene Eindringtiefen sind durch die Empfänger-Sender-abstände bedingt. Im Zentrum ist eine sich aufwölbende Widerstands-anomalie zu erkennen, die im Osten flacher als im Westen abfällt.

Aus diesem Grund wurde der aufgenommene Datensatz mit dem neu entwickelten 3D Algorithmus modelliert. Hierbei wurde getestet, wie verschiedene 3D Widerstandsverteilungen des Untergrundes dem Datensatz entsprechen. Die Grundzüge der Modelle bestehen aus einem geschichteten Hintergrundmodell, welche sich aus den 1D Modellen und regionalen seismischen und elektromagnetischen Profilen ergaben. Eine räumliche Abgrenzung der möglichen 3D Widerstandsanomalie wurde aus den seismischen Daten hergeleitet, da die laterale Übereinstimmung der scheinbaren Widerstandsanomalie mit den seismischen Daten sehr überzeugend ist, und da seismische Daten eine höhere Strukturauflösung haben. Variiert wurden die vertikale Lage der Anomalie sowie der Widerstand innerhalb der Anomalie. Abbildung 26 zeigt das 3D Model, welches den 3D CSEM-Daten am besten entspricht. Es besteht aus 2 kubusartigen Anomalien mit einem Widerstand zwischen 5 und 6 Ohm m, die sich bis auf mindestens 20 m dem Meeresboden annähern. Dass sich die Werte der Anomalie von den 2D Profilen unterscheiden, zeigt, dass bei einer genauen Analyse der Methanhydratkonzentrationen 3D Effekte nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

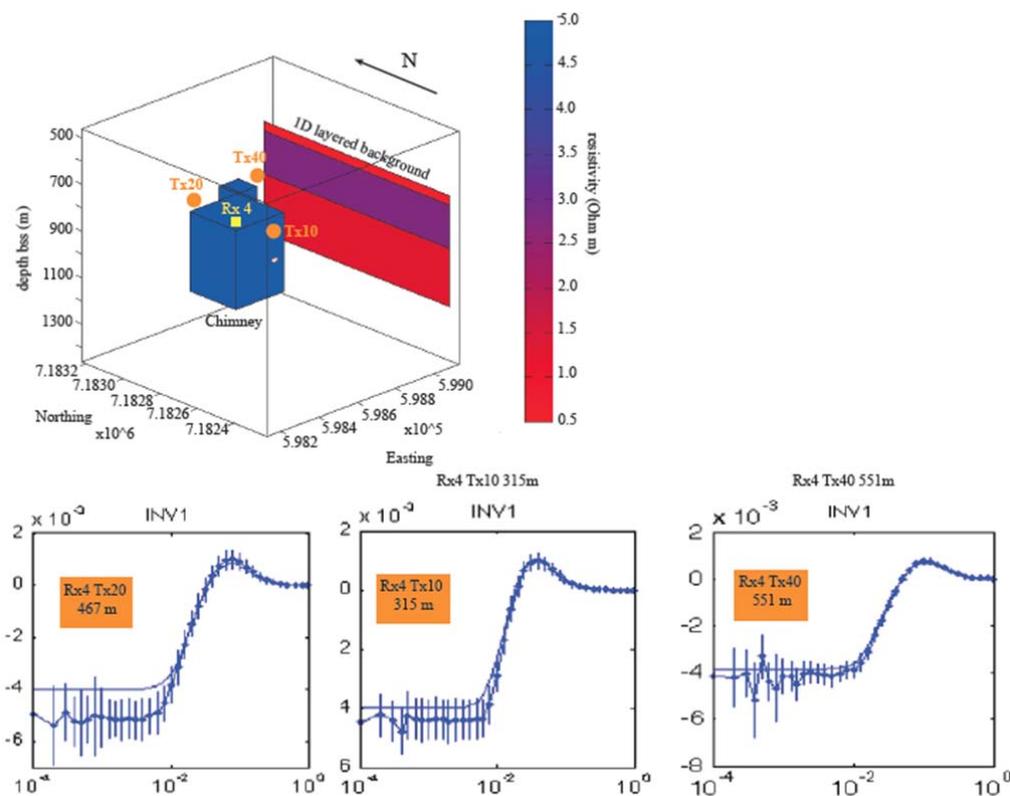


Abbildung 26: 3D Model, welches aus den 3D CSEM-Daten entwickelt wurde.

### c. Verbesserte Methanhydratkonzentrationsbestimmung durch die kombinierte Auswertung elektromagnetischer und seismischer Daten

Während in den oben dargestellten Arbeiten die strukturelle Information der seismischen Daten mit den elektromagnetischen verknüpft wurden, um die Ausdehnung und Größe der Widerstandsanomalie bestmöglich zu bestimmen, sollte außerdem der komplementäre Informationsgehalt des Widerstands und der seismischen Geschwindigkeit benutzt werden, um die Methanhydratkonzentration genauer zu bestimmen. Die seismische Geschwindigkeit wie auch der elektrische Widerstand hängen von der Art und Weise ab, wie das Methan im Sediment verteilt ist, wie viel Frischwasser zur Methanhydratbildung zur Verfügung steht,

sowie von Sedimenteigenschaften wie Porosität und Dichte ab. Ein weiterer wichtiger Parameter für den Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und Methanhydratkonzentration ist der Widerstand der Porenflüssigkeit, welche wiederum durch deren Salinität bestimmt wird. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen physikalischen Parameters und der Methanhydratkonzentration wird durch theoretische oder semiempirische effektive Mediumtheorien parametrisiert. Für den Zusammenhang von Methanhydratkonzentration und Widerstand wird dies generell durch das Gesetz von Archie (1942) beschrieben, für den Zusammenhang mit der seismischen Geschwindigkeiten gibt es verschiedene Ansätze. Je nach effektiver Mediumtheorie können sich für den gleichen Wert des physikalischen Parameters verschiedene Hydratkonzentrationen ergeben. Für die seismischen Untersuchungen im Nyegga Gebiet ergab sich zum Beispiel aus der seismischen Geschwindigkeit in der zentralen Fluidaufstiegsstruktur an der L100 Schicht Werte von 27% für die Methanhydratkonzentration im Porenraum, wenn angenommen wurde, dass zusammen mit dem Gas Frischwasser in die Formation eintritt. Ohne zusätzliche Wasserzufuhr, d.h. wenn alleine das Wasser aus dem Porenraum zur Methanhydratbildung beiträgt, liegt die vorausgesagte Methanhydratkonzentration bei nur 11%. Das heißt, dass selbst bei genauer Bestimmung des physikalischen Parameters wegen der fundamentalen Vieldeutigkeit der Beziehung zwischen Methanhydratkonzentrationen und seismischer Geschwindigkeit, die Methanhydratkonzentration nicht genau abgeschätzt werden kann, In dem von uns untersuchten Beispiel liegt die Ungenauigkeit bei +/- 50%. Die Vieldeutigkeit gilt auch für den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Methanhydratkonzentration. Vorteilhafterweise verhalten sich die Zusammenhänge aber unterschiedlich. In dem Fall, dass kein Frischwasser zur Methanhydratformation bereitgestellt wird, würde sich die Salinität des Porenwasser erhöhen und damit der Widerstand des Porenwassers stark sinken. Um den gleichen elektrischen Widerstand zu erklären, müssten in diesem Fall die Methanhydratkonzentration im Vergleich zu Methanhydraten die mit zusätzlicher Wasserversorgung entstanden sind, erhöht sein, während die seismischen Geschwindigkeiten hiervon unberührt bleiben. Umgekehrt sind Gashydratkonzentrationsbestimmung durch seismische Verfahren in hohem Maße von Änderungen der Lithologie abhängig, während dies für die elektromagnetischen Inversionen von untergeordneter Bedeutung ist.

Anhand der aus den Messungen bestimmten physikalischen Parametern wie der seismischen Geschwindigkeit und dem elektrischen Widerstand in der Fluidaufstiegsstruktur wurde analysiert, welches Effektives-Medium Model für beide beobachteten Parameter dieselbe Methanhydratkonzentration ergeben. Für die Bestimmung der Gashydratkonzentration aus dem elektrischem Widerstand ist die Porosität von entscheidender Bedeutung. Während in der Einzelauswertung elektromagnetischer Daten diese meist nur geschätzt werden kann, konnten sie in der kombinierten Analyse anhand der seismischen Geschwindigkeiten hergeleitet werden. Ein weiterer wichtiger Parameter im Gesetz von Archie ist der Zementierungskoeffizient, welcher anhand der Mineralogie aus geotechnischen Bohrungen in der Nähe der Fluidaufstiegsstruktur bestimmt wurde und der Widerstand der Porenflüssigkeit welcher anhand von CTD Messungen hergeleitet wurde. Aus der Analyse ergab sich, dass sich eine übereinstimmende Methanhydratkonzentration nur für ein Model ergibt, dass eine zusätzliche Zufuhr von Wasser mit Gas beinhaltet. Unter dieser Annahme ergibt sich eine einheitliche Methanhydratkonzentration von 27% bis 31% innerhalb der unteren und mittleren Fluidaufstiegsstruktur. In der oberen Fluidaufstiegsstruktur weicht der gleichbleibend hohe Widerstand in dem elektrischen Widerstandsmodell systematisch von der sich erniedrigenden Geschwindigkeit des seismischen Modells ab. Während sich hier mit dem gewählten Effektivem Medium Model 21% Methanhydratkonzentration aus der seismischen Geschwindigkeit ergeben, weisen die elektrischen Daten auf eine Konzentration von 35% hin. Die Diskrepanz könnte durch das verringerte Auflösungsvermögen des seismischen Tomographie-Modells im Vergleich zu dem elektromagnetischen Tomographie-Model resultieren. Dies sollte aber noch genauer untersucht werden.

#### d. Elektromagnetische Messung zur Vorbereitung einer Bohrkampagne im Schwarzen Meer

Während der Maria S. Merian Ausfahrt MSM35 wurde das 3D tomographische CSEM System des GEOMARs in zwei von der Seismik definierten Arbeitsgebieten eingesetzt (siehe Abb. 27). Dabei soll anhand seismischer und elektromagnetischer Datenanalyse untersucht werden, ob sich in den Arbeitsgebieten ausreichende Methanhydratkonzentrationen in mit MEBO erbohrbaren Tiefen findet. Die aufgenommenen 3D CSEM Daten sind von hoher Qualität, wie eine erste Analyse der Daten im Arbeitsgebiet 1 zeigt. Die aus den Daten abgeleiteten scheinbaren Widerstände sind hoch, was auf eine mögliche hohe Methanhydratkonzentration hinweist. Die Auswertung der seismischen und elektromagnetischen Daten ist in der 3. SUGAR Phase geplant.

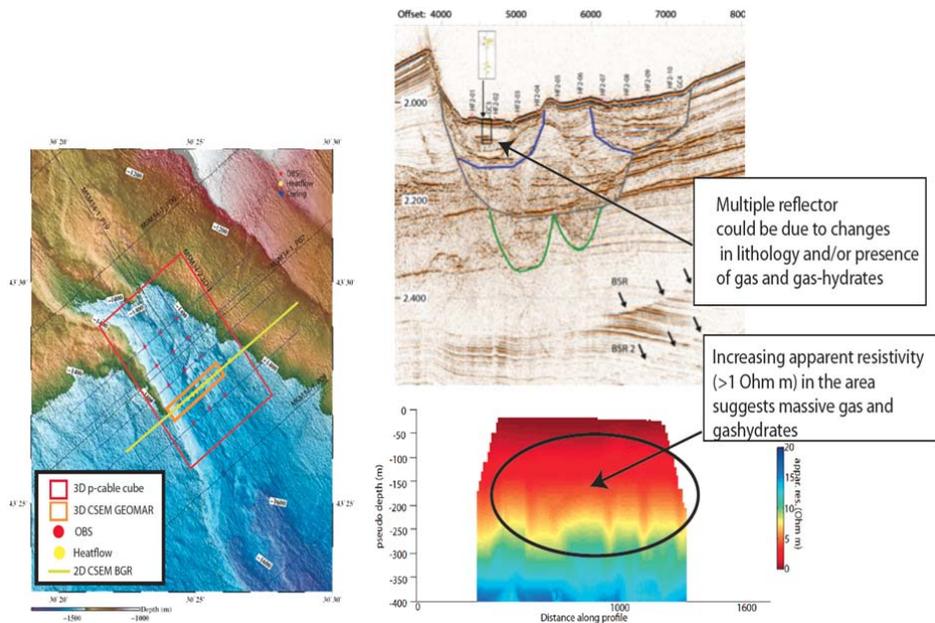


Abbildung 27: Auslage der geophysikalischen Experimente im Arbeitsgebiet 1 (oben links) zur Untersuchung von Channel-Levee Systemen im Donau Delta (oben rechts). Erste Analyse der scheinbaren Widerstände des GEOMAR Experiments weisen auf hohe Widerstände hin, die sich auf erhöht Methanhydratkonzentrationen zurückgeführt werden können.

#### A3:

Die Arbeiten im Teilprojekt A3 konzentrierten sich im Wesentlichen auf die Anwendung und Weiterentwicklung des Gashydratmoduls in PetroMod. Darüber hinaus wurden die während Phase 1 begonnenen Arbeiten zur Abschätzung globaler Gashydratvorkommen zum Abschluss gebracht. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus beiden Gebieten dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt I erwähnt konnten die Arbeiten zur Abschätzung zur globalen Menge an Gashydraten in marinen Sedimenten im Rahmen von zwei Publikationen abgeschlossen werden (Wallmann et al., 2012; Pinero et al., 2013; Abb. 1, 2). Grundsätzlich basieren diese Arbeiten auf der systematischen Anwendung eines von Wallmann et al. (2006) entwickelten numerischen Modells. Hieraus konnten die Akkumulation organischer Substanz, die Größe des Gashydrat-Stabilitätsfeldes sowie der vertikale Aufstieg von Porenwasser als wichtigste Steuerparameter bei der Bildung von Gashydraten ermittelt und, anhand von systematischen Parametervariationen, vereinfachte Gleichungen zur Vorhersage von Gashydratmengen entwickelt werden (Wallmann et al., 2012; Pinero et al., 2013):

$$FF = 0.0001 \cdot SR \cdot (2 + \ln[POC]) \quad (1)$$

$$\text{für } FF \geq 0.0001 \cdot SR \cdot (2 + \ln[POC]): GH_{FF} = c1 \cdot L_{GHSZ}^{c2} \left( c3 + \frac{1}{SR} \right) \cdot (POC + c4 \cdot FF^{c5}) \cdot POC^{c6} \quad (2)$$

$$\text{für } FF < 0.0001 \cdot SR \cdot (2 + \ln[POC]): GH_{FF} = GHI - c7 \cdot 10^{-8} L_{GHSZ}^{c8} \cdot \left( 1 + \frac{1}{SR} \right) \cdot FF \cdot POC^{c9} \quad (3)$$

und

$$GHI = a1 \cdot L_{GHSZ}^{a2} \cdot \left( POC + \frac{a3}{SR^{a4}} \right) \cdot \exp \left[ - \left( a5^{1/POC} + a6 \cdot \ln \left[ \frac{SR}{POC} \right] \right)^2 \right] \quad (4)$$

Hierbei ist FF die vertikale Fluidaufstiegsgeschwindigkeit in cm pro Jahr, SR die Sedimentationsrate in cm pro 1000 Jahre, POC der Gehalt an organischem Kohlenstoff in Gew.%, GHI bzw.  $GH_{FF}$  die Menge an Gashydrat in kg pro  $m^2$  Meeresbodenoberfläche (ohne und mit Berücksichtigung von Fluidaufstieg) und  $L_{GHSZ}$  ist die Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone in Meter. Die Koeffizienten sind:  $c1 = 0.024$ ,  $c2 = 1.587$ ,  $c3 = 0.0224$ ,  $c4 = 266084$ ,  $c5 = 2.75$ ,  $c6 = 0.063$ ,  $c7 = 0.003$ ,  $c8 = 4.68$ ,  $c9 = 2.31$  sowie  $a1 = 0.002848$ ,  $a2 = 1.681$ ,  $a3 = 24.42$ ,  $a4 = 0.9944$ ,  $a5 = -1.441$ ,  $a6 = 0.3925$ .

Passive	Active	Normal compaction	
	No fluid flow	$1 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$	$2 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$
(a) Approach #1: Holocene			
Normal compaction	3	56.2	15.06
Full compaction	5.5	59.4	18.22
(b) Approach #2: Average			
Normal compaction	5.14	14.1	9.5
Full compaction	5.3	15	10.4
(c) Approach #3: Quaternary			
Normal compaction	122	162.6	359.5
Full compaction	313	338.3	535.2

Tabelle 1: Berechnung der globalen, submarinen Gashydratmengen in Gt C unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schätzungen für die Sedimentationsgeschwindigkeit und den organischen Kohlenstoffeintrag (Holozän, Quartär, oder gemittelt über die gesamte Sedimentationsgeschichte), unterschiedlichem Kompaktionsgrad sowie unterschiedlichen Annahmen für die Fluidaufstiegsgeschwindigkeit (aus Pinero et al, 2013).

Die vorliegenden Gleichungen wurden dann auf global verfügbare Datensätze der Bathymetrie, Bodenwassertemperatur, Wärmestromverteilung, Kohlenstoff-Konzentration sowie der Sedimentakkumulationsrate angewendet. Insgesamt ergeben sich daraus, wie in Abbildung 2 gezeigt, in Gashydraten gespeicherte Kohlenstoffmengen von bis zu ~550 Gt C. In Tabelle 1 (Pinero et al., 2013) sind einige Ergebnisse von Parametervariationen gezeigt. Diese Ergebnisse verdeutlichen den großen Einfluss der verschiedenen Steuerparameter. Beispielsweise hat die Annahme holozäner, quartärer oder über die gesamte Sedimentationsgeschichte gemittelter Sedimentationsgeschwindigkeiten und dem damit verbundenem Kohlenstoffeintrag einen starken Einfluss auf das Bildungspotenzial von Gashydraten. Vergleichbar groß ist auch der Einfluss vertikaler Fluidaufstiegsgeschwindigkeiten auf die potentiell vorhandene Gashydratmenge. Einen geringeren, aber dennoch nennenswerten Einfluss hat zudem der Kompaktionsgrad der Sedimente. Für alle drei Parameter gibt es nach derzeitigem Kenntnisstand nur wenig belastbare Datensätze

bzgl. globaler Verteilungsmuster. Das Szenario mit maximaler Sediment- und Kohlenstoffakkumulation, Kompaktion und Fluidaufstiegsgeschwindigkeit entspricht einer Maximalschätzung, so dass positive Abweichungen dieser Berechnungen als unwahrscheinlich anzusehen sind. Regionale und lokale Abweichungen sind hingegen zu erwarten, insbesondere durch die Migration von freiem Gas entlang von Störungszonen sowie lokal stark erhöhten Fluidaufstiegsgeschwindigkeiten. Die Berücksichtigung solcher feinskaliger Parametrisierungen ist nur mit anderen Modellansätzen wie z.B. der Beckenmodellierung mit PetroMod möglich.

Während der ersten Förderphase von SUGAR wurde gemeinsam mit Mitarbeitern von Schlumberger-AaTC ein Softwaremodul für die Erweiterung des PetroMod Simulators zur Simulation von Gashydratvorkommen entwickelt. Neben der Behebung einiger Fehler konnte die generelle Funktionalität des Moduls verbessert werden. Dies betrifft beispielsweise eine bessere und vereinfachte Darstellung von Gashydratvorkommen. Da der größte Anteil submariner Gashydrate auf die Bildung biogenen Methans in Sedimenttiefen von wenigen hundert Metern sowie geringen Temperaturen zurückzuführen ist, wurde bereits in der ersten Förderphase mit der Implementierung kinetischer Formulierungen zur Simulation des mikrobiellen Abbaus organischer Substanz begonnen. Dieses Werkzeug steht mittlerweile voll funktionsfähig zur Verfügung und wurde entsprechend für die bislang untersuchten Arbeitsgebiete verwendet.

Das Hauptarbeitsgebiet während der zweiten Förderphase war das bereits zu Explorationszwecken geologisch sehr genau untersuchte Gebiet an der Nordküste Alaskas, „Alaska North Slope“. Hier konnte ein großräumiges 3D-Beckenmodell als Grundlage genutzt werden was aus einer Zusammenarbeit von Schlumberger und dem USGS (United States Geological Survey) resultierte (Abb. 28). Der USGS exploriert seit 2001 intensiv die dortigen Gashydratvorkommen und führt derzeit erste Feldtests zum Hydratabbau durch.

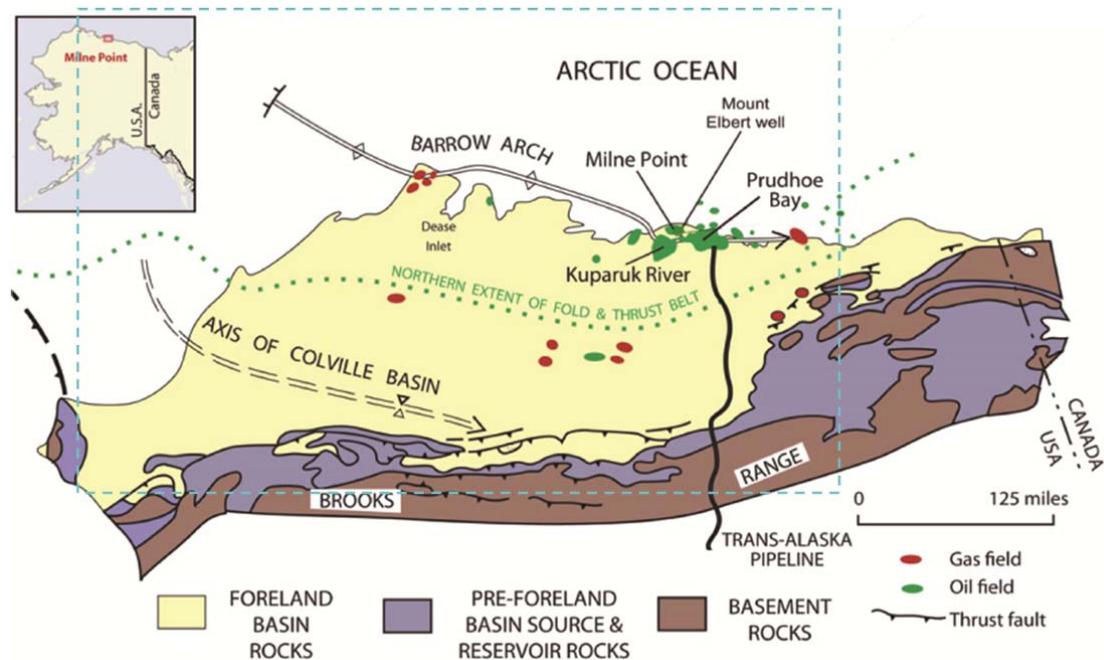


Abbildung 28: Lage des Testgebietes „Alaska North Slope“ (Boswell et al., 2011). Die gestrichelte Linie beschreibt das PetroMod Modellgebiet.

Der Fortschritt bei der Modellierung ist nachfolgend in wesentlichen Zügen dokumentiert. Die Ergebnisse wurden entsprechen auf den SUGAR Vollversammlungen sowie internationalen Tagungen vorgestellt (Piñero et al., 2012, 2013a, b, c, 2014a, b, c). Abbildung 29 zeigt den heutigen Bereich der Gashydratstabilitätszone im Bereich des Modellgebietes. Wie bereits früher gezeigt werden konnte, deckt sich die modellierte, räumliche Erstreckung und Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone im Wesentlichen mit Ergebnissen von Collett et al. (2010).



Abbildung 29: Rezente Ausdehnung Gashydratstabilitätszone im Arbeitsgebiet. Der blaue Kreis zeigt die Lage der Mount Elbert Testbohrung.

Ein wichtiges Ziel der 2. Phase war, zu überprüfen, inwieweit simulierte Ergebnisse mit tatsächlich im Feld gemessenen Daten übereinstimmen. Hierzu wurden unter anderem Ergebnisse des Mount Elbert Testfeldes herangezogen, die in Abbildung 30 verglichen werden. Es zeigt sich, dass tatsächlich Gashydratvorkommen in einem entsprechenden Tiefenbereich prognostiziert werden und die Gesamtmengen in ungefähre Übereinstimmung sind. Abweichungen gibt es allerdings in Bezug auf die räumliche Ausdehnung und die Maximalkonzentrationen. Mögliche Gründe für diese Unterschiede sind zum einen in einer möglicherweise noch zu geringen räumlichen Auflösung des Modells sowie vor allem in der Herkunft des Methans und entsprechenden Eintragungswegen zu suchen. Nach Lorenson et al. (2011) stammt der größte Anteil an Gashydraten in diesem Gebiet aus thermogener Methanbildung. Typischerweise verläuft die Migration von thermogenem Gas aus größeren Sedimenttiefen entlang von offenen Störungen und anderen hochpermeablen Wegsamkeiten im Sediment. Zur Annäherung an dieses Problem wurden eine Vielzahl von Modellläufen mit Parametervariationen zur Lage, Permeabilität und Öffnungsdauer von Störungen insbesondere im Bereich der Mount Elbert und Ignik Sikumi Testfelder durchgeführt. Ein Ergebnis hierzu ist stellvertretend in einem S-N Schnitt in Abbildung 31 gezeigt. Die fleckenhaft verteilten Gashydratvorkommen sind in diesem Szenario ausschließlich auf die Zufuhr thermogenen Methan zurückzuführen. Ein abschließendes Szenario, was die an der Bohrlokalationen gefundenen Konzentrationen widerspiegelt, wird in Kürze fertiggestellt sein (Piñero et al., in prep a).

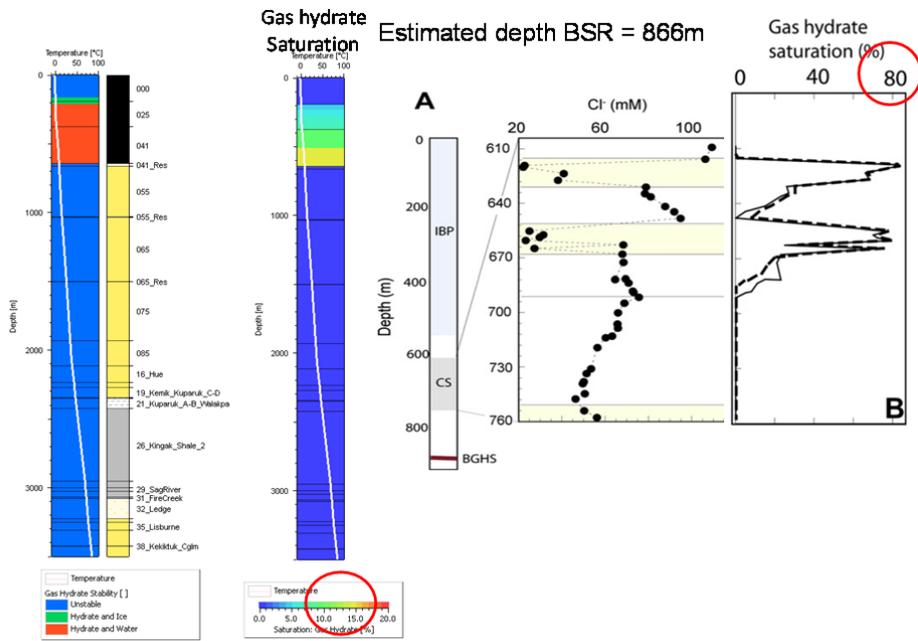


Abbildung 30: Vergleich von mit PetroMod simulierten und aus Messergebnissen abgeleiteten Gashydratkonzentrationen (Torres et al., 2011) an der „Mount Elbert“ Testbohrung.

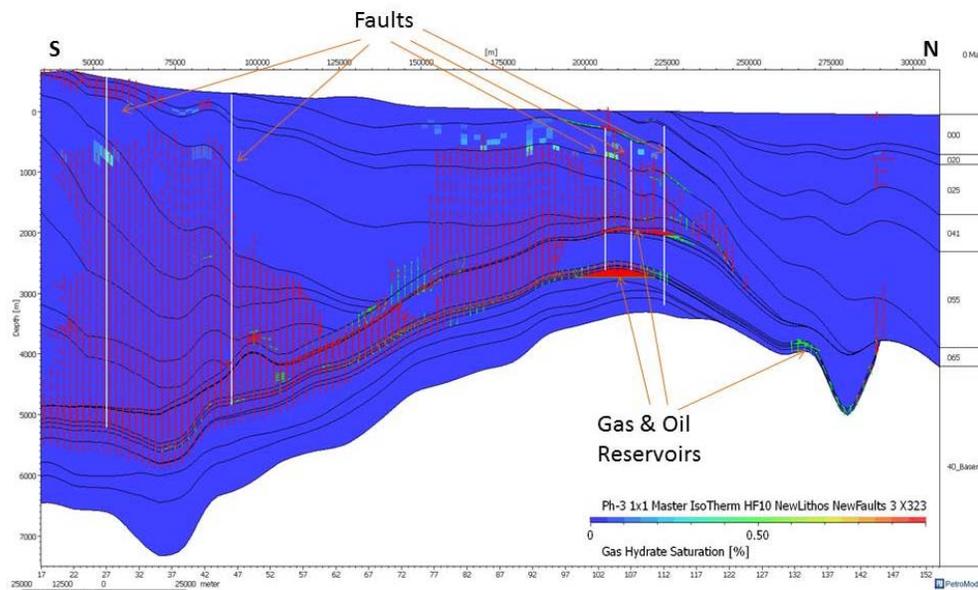


Abbildung 31: Gashydrat-Sättigung in einem 2-D Schnitt (S-N Ausrichtung) des Alaska North Slope Modells. Störungen sind als weiße Linien eingezeichnet; rote und grüne Pfeile markieren die Gas- und Petroleum-Migrationswege.

Da es sich bei dem „Alaska North Slope“ Modell um ein sehr komplexes geologisches Szenario handelt, in dem es teilweise schwierig ist, Veränderungen im Modellergebnis jeweils exakt auf spezifische Ursachen zurückzuführen, wurden parallel dazu Tests mit

einem vereinfachten „Layer Cake Model“ durchgeführt. Ziel war es, den Effekt von Störungen auf die Gashydratverteilung spezifisch herauszuarbeiten. Das vereinfachte Modell besteht aus insgesamt 15 stratigraphischen Einheiten, mit einem prominenten Sandhorizont (Schicht 6) im Bereich der GHSZ, der durch eine deutlich höhere Permeabilität gekennzeichnet ist (Abb. 32). In den Schichten oberhalb des Sandhorizontes findet biogene Methanproduktion statt; thermogene Methanproduktion ist auf zwei Schichten im Bereich unterhalb des Sandhorizontes begrenzt. Die Sedimentabfolge wird lokal von zwei Störungen durchtrennt. Die Modellierung zeigt, dass das thermogene Gas vorwiegend in die hochpermeable Schicht 6 wandert; in den beiden darüber liegenden Schichten finden sich Gashydrate sowohl aus biogenen als auch aus thermogenen Quellen (Abb. 33). Ein wesentlicher Anteil des thermogenen Gases wird offensichtlich entlang der beiden Störungen transportiert. Diese bilden sich auch innerhalb von Schicht 6 in Form leicht erhöhter Gashydratkonzentrationen ab (Abb. 33). Eine ausführlichere Darstellung der Ergebnisse ist derzeit in Vorbereitung (Piñero et al., in prep b).

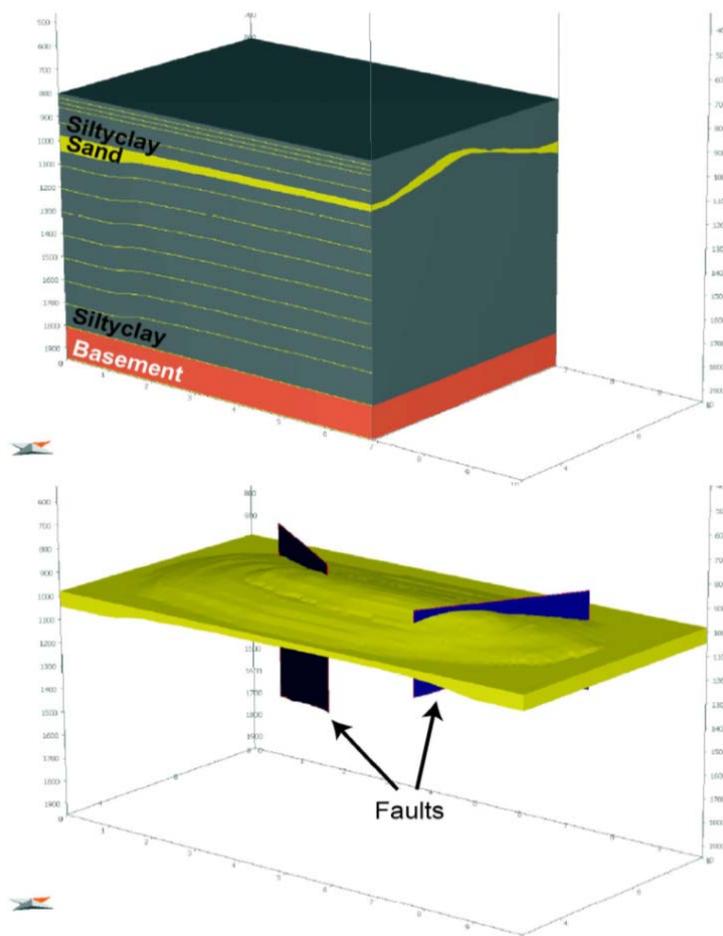


Abbildung 32: „Layer Cake Model“ mit Schichtaufbau und Lage der Störungen in Bezug auf Schicht 6 (Sandhorizont).

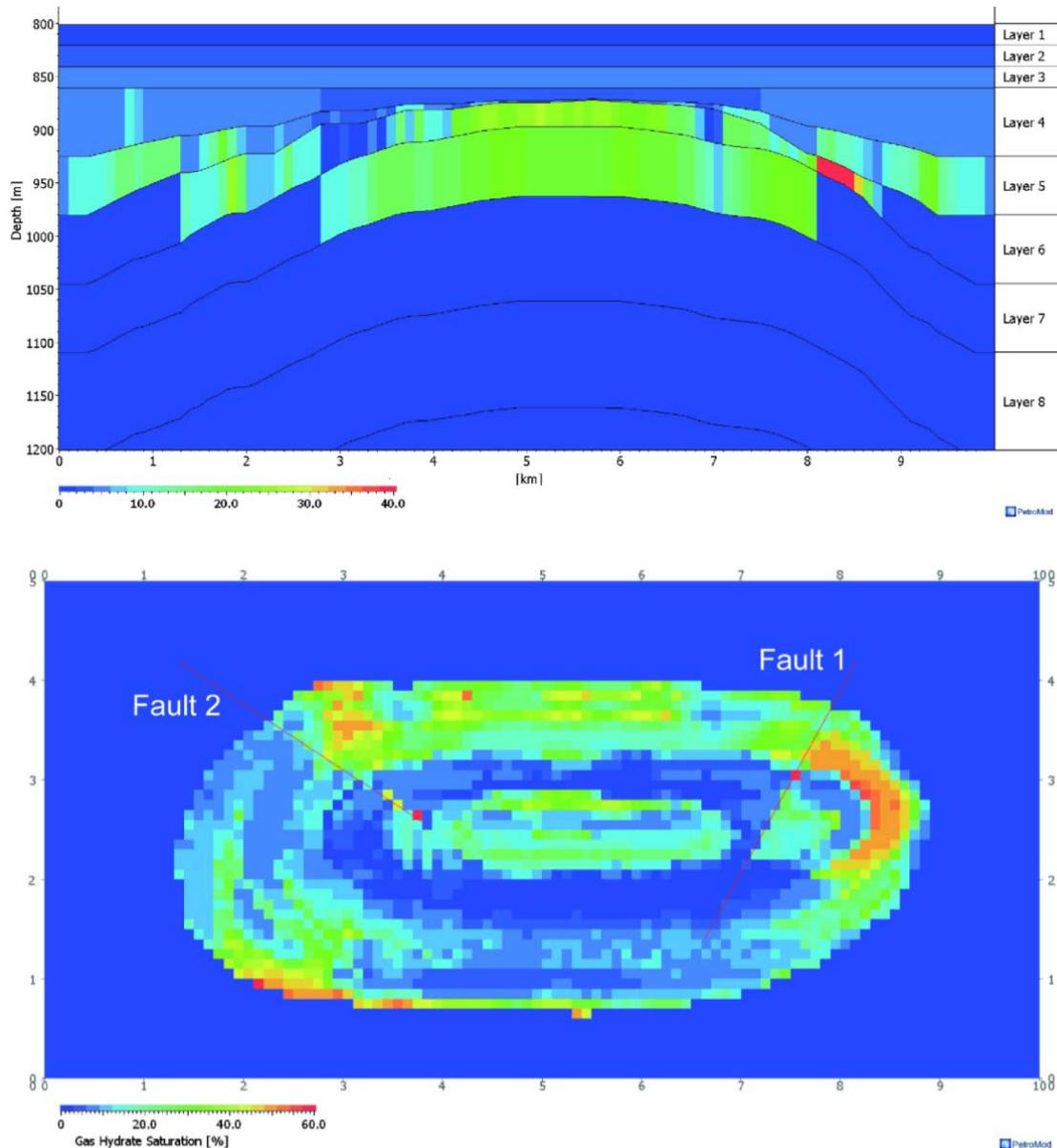


Abbildung 33: Gashydratanreicherung im „Layer Cake Model“ ist im Wesentlichen auf die hochpermeable Schicht 6 (Sandhorizont) sowie die beiden darüber liegenden Schichten begrenzt (oben). Entlang der Störungen sind auch innerhalb von Schicht 6 leicht erhöhte Gashydratkonzentrationen zu erkennen, die die Störungen in Teilen nachbilden (unten).

Weitere Simulationen zur Gashydratakkumulation mit PetroMod wurden auf Basis neuerer seismischer Untersuchungen und IODP Bohrlochinformationen in der Region „Hydrate Ridge“ vor der Küste Oregons durchgeführt. Die Lokation des Gebietes ist in Abbildung 34 gezeigt. Typisch für „Hydrate Ridge“ sind u.a. Gasaustritte sowie direkt am Meeresboden anstehende Gashydrate. In dem für die Simulation ausgewählten Gebiet findet ein wesentlicher Teil des Gastransportes entlang des seismischen Horizontes A (Abb. 35) statt. Innerhalb der GHSZ erbrachte die Simulation eine Gashydratanreicherung in diesem Horizont von bis zu 60 vol.%. (Abb. 36). Der Horizont A sowie weitere, vertikal verlaufende Störungen konnten somit als wichtige Leitbahnen für den Gastransport aus dem Untergrund nachgewiesen werden und sind vermutlich auch hauptverantwortlich für die Freisetzung von

methan in die Wassersäule. Zu diesen Arbeiten befindet sich ebenfalls eine Publikation in Vorbereitung.

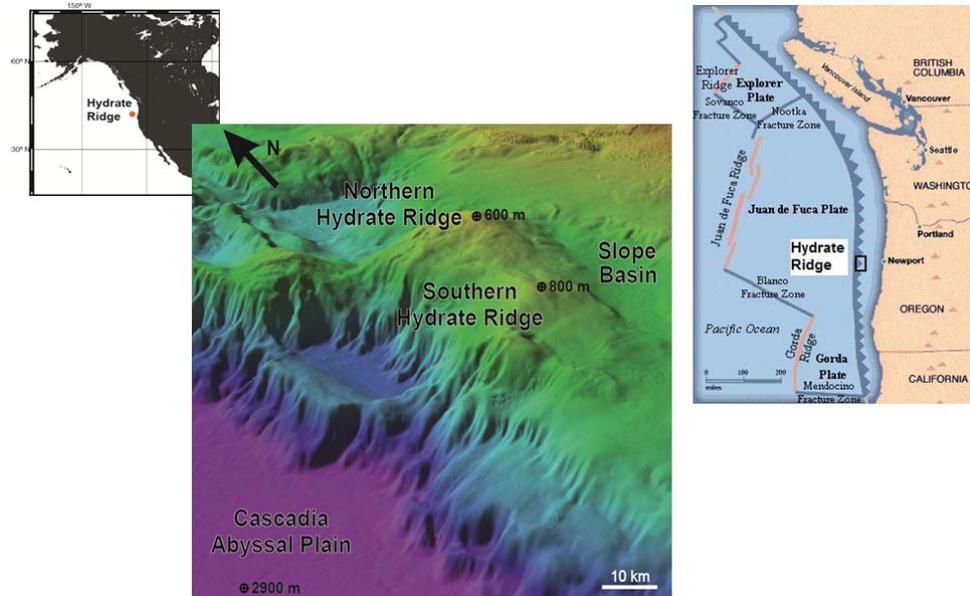


Abbildung 34: Lokation von „Hydrate Ridge“ auf dem Akkretionskeil zwischen der abtauchenden Juan de Fuca und Nordamerikanischen Platte.

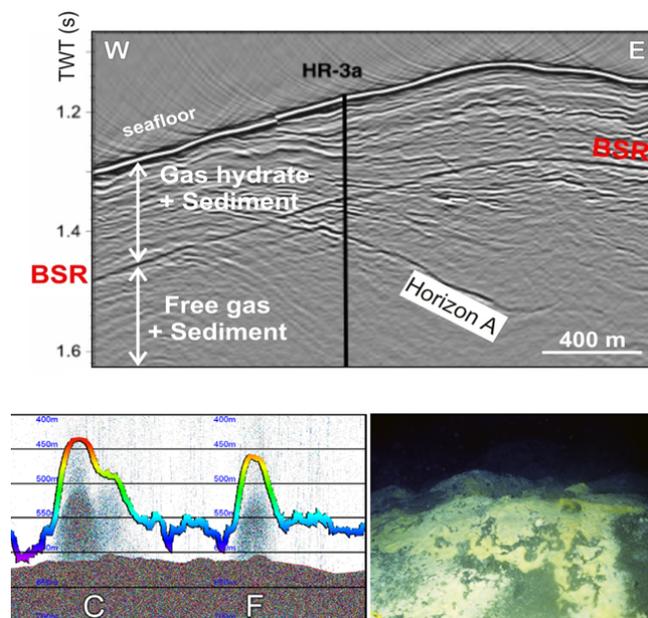


Abbildung 35: Seismisches Profil am „Hydrate Ridge“ (nach Tréhu et al., 2006) mit Informationen zur Lage des BSR sowie des seismischen Horizontes A, der einen Eintragungsweg für die Migration freien Gases in die GHSZ darstellt (oben). Methangas-Fahnen in der Wassersäule (Kannberg et al., 2013) und Bakterienmatten als Anzeichen intensiven Methanaustritts am Meeresboden.

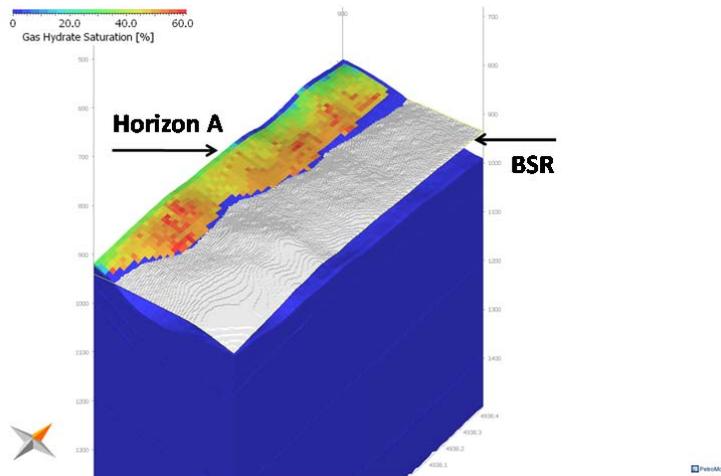


Abbildung 36: PetroMod Simulation mit Lage des BSR und der massiven Gashydrat-anreicherung entlang des Horizontes A.

#### Literatur:

- Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *J. Petrol. Technol.*, 5, 1-8.
- Baristean, N. (2006). Seismische Fazies, Tektonik und Gashydratvorkommen im nordwestlichen Schwarzen Meer. Geowissenschaften. Hamburg, Hamburg. Diploma Thesis.
- Collett, T.S., Lee, M.W., Agena, W.F., Miller, J.F., Lewis, K.A., Zyrianova, M.V., Boswell, R., Inks, T.L. (2011) Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine Petroleum Geology* 28(2), 279-294.
- Hölz, S., A. Swidinsky, M. Sommer, M. Jegen and J. Bialas, 2014. The Use of Rotational Invariants for the Interpretation of Marine CSEM Data with a Case Study from the North Alex Mud Volcano, West Nile Delta. In review at GJI.
- Kannberg, P.K., Tréhu, A.M., Pierce, S.D., Paull, C.K., Caress, D.W. (2013) Temporal variation of methane flares in the ocean above Hydrate Ridge, Oregon. *Earth and Planetary Science Letters* 368, 33-42.
- Lorenson, T.D., Collett, T.S., Hunter, R.B. (2011) Gas geochemistry of the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: Implications for gas hydrate exploration in the Arctic. *Marine Petroleum Geology* 28(2), 343-360.
- Plaza-Faverola, A., Westbrook, G.K., Ker, S., Exley, R.J.K., Gailler, A., Minshull, T.A. & Broto, K. 2010 Evidence from three-dimensional seismic tomography for a substantial accumulation of gas hydrate in a fluid-escape chimney in the Nyegga pockmark field, offshore Norway, *J. Geophys. Res.*, 115, B08104.
- Popescu, I., et al. (2006) Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions. *Marine Geology* 227(3-4), 163-176.
- Popescu, I., et al. (2007) Seismic expression of gas and gas hydrates across the western Black Sea. *Geo-Marine Letters* 27(2), 173-183.
- Sommer, M., Hölz, S., Moorkamp, M., Swidinsky, A., Heincke, B., Scholl, C. and Jegen, M. D. (2013) GPU parallelization of a three dimensional marine CSEM code. *Computers & Geosciences* 58, 91-99.
- Swidinsky, A. and M. Jegen, 2012a: An examination of petrophysically coupled joint inversions using marine controlled-source electromagnetic and seismic reflection data. SEG conference workshop, Las Vegas, USA, November 4-7 2012.

- Swidinsky A., C. Scholl & M. Jegen, 2012b: Determination of reservoir and rock physics parameters using a petrophysically coupled joint inversion of CSEM and seismic AVA data. EAGE conference, Copenhagen, Denmark, June 4-7 2012.
- Swidinsky A., S. Hölz & M. Jegen, 2012c: Rapid resistivity imaging using a transient marine CSEM survey with two transmitter polarizations. EAGE conference, London, UK, June 10<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>, 2013 (extended abstract).
- Swidinsky A. and R.N. Edwards, 2013. Locating seafloor receivers using late time CSEM fields: Theory and application. Marelec Conference, Hamburg, July 16<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup>, 2013.
- Swidinsky, A., Hölz S. and Jegen M. (2014). Rapid resistivity imaging for marine CSEM surveys with two transmitter polarizations: An application to the North Alex mud volcano, West Nile Delta. Accepted at Geophysics.
- Tréhu, A.M., Bohrmann, G., Rack, F.R., Torres, M.E. (2003) Proc. ODP, Initial Reports 204, College Station, doi:10.2973/odp.proc.ir.204.2003.
- Torres, M.E., Collett, T.S., Rose, K.K., Sample, J.C., Agena, W.F., Rosenbaum, E.J. (2011) Pore fluid geochemistry from the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. Marine and Petroleum Geology 28, 332-342.

## **2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

### **A1-2:**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises beziehen sich auf die Personalmittel für den wissenschaftlichen Mitarbeiter Dr. Jens Schneider von Deimling und seinen späteren Nachfolger, den Techniker Matthias Wieck.

Herr Schneider von Deimling hat durch seine Erfahrung im Bereich der Multibeamssysteme die entscheidenden Impulse zur Ideengestaltung und Entwicklung der Software und Verfahrensschritte im Projekt SUGAR-II A1-2 gegeben. Dies betrifft die Arbeiten im Teilprojekt A1-2 ebenso wie den Dialog mit den Projektpartnern ELAC (TP A-1.1). Sein Einsatz während der verschiedenen Testfahrten hat entscheidend dazu beigetragen die für den Fortschritt des Projektes genutzten Datensätze zu generieren und auszuwerten. Nach dem Wechsel von Herrn Schneider von Deimling zum Exzellenz Cluster Future Ocean wurde die wissenschaftliche Projektstelle in eine Technikerstelle umgewandelt. Dadurch konnte, unter fortgesetzter Anleitung von Dr. Schneider von Deimling, die Konstruktion und der Bau der Bubble Box konzentriert zur Einsatzreife weitergeführt werden. Da der seitens des TLZ GEOMAR in den Bau involvierte Techniker Matthias Wieck dort nur auf einem Zeitvertrag beschäftigt war wäre andernfalls das erworbene Know-How im Projekt verloren gegangen.

### **A2-2:**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind durch die Personalmittel und nach der vereinbarten Umwidmung die Unterstützung der Expedition MSM34 zum Donau Delta im Schwarzen Meer gegeben.

Nach dem Weggang von Dr. Crutchley zur Mitte des Projektes war eine Wiederbesetzung der Stelle in gleicher Fachqualität nicht zu gewährleisten. Verbleibende Projektmittel wurden daher umgewidmet, um durch die Mitarbeit der Doktoranden Zander und Schröder eine fachgerechte Unterstützung der Schiffsexpedition MSM34 zu gewährleisten. Beide Mitarbeiter hatten sich im Rahmen ihrer MSc Arbeiten und durch Teilnahme an anderen Schiffsexpeditionen Fachkenntnisse im Umgang mit den seismischen Geräten des GEOMAR erarbeitet. Im Rahmen der Fahrtvorbereitung wurden eine umfangreiche Übersicht des Zielgebietes zusammengestellt, die auch den mit der Entwicklung der Bohrtechnik und Bohrlochmodellierung betrauten Teilprojekten SUGAR-B zur Verfügung gestellt. Mit der

zweimonatigen Fahrtteilnahme von Dez. 2013 bis Jan. 2014 wurde die fließende Übergabe der Messergebnisse aus Fahrtabschnitt eins an Abschnitt zwei sichergestellt.

Die Mitarbeiterinnen Fr. Dr. Dannowski und Fr. Dr. Krabbenhöft haben die Aufarbeitung der OBS Datensätze ausgeführt. 3D Verarbeitung sowie S-Wellen Analyse und Anisotropie Betrachtungen stellen deutlich höhere Ansprüche an die Relokalisierung der Gerätepositionen und Kenntnis der Ausrichtungswinkel der Seismometer, als dies im üblichen 2D Verfahren der Fall ist. Durch die Fachkompetenz konnten ältere Datensätze entsprechend aufbereitet, Softwareroutinen an die geforderten Genauigkeiten angepasst und die notwendigen Processing-Routinen für eine zukünftige systematische Verarbeitung bereit gestellt werden.

Durch erst verspätete Personaleinstellungen, Personalabgänge und günstige Preisverhandlungen bei anderen Kostenstellen konnten umfangreiche Gelder eingespart werden. Diese Mittel wurden mit Umwidmungsantrag neben den neuen Doktoranden Positionen für expeditionsbezogene Verbrauchsmittel und Reisekosten verausgabt.

#### **A2-5:**

Gelder für Personalstellen wurden wie geplant ausgegeben. Da die Mieten des HyBIS Systems und der DASI Quelle aufgrund von Kursschwankungen und durch den Wegfall der Windenmiete um ca 15 000 Euro geringer ausfielen, konnten die anfallenden Restgelder für die Finanzierung der Datenakquise im Schwarzen Meer verwendet. Budgetverschiebungen wurden in Absprache mit dem PTJ ausgeführt.

#### **A3:**

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises beziehen sich auf die Personalmittel für die wissenschaftliche Mitarbeiterin Dr. Elena Pinero sowie die Anschaffung von mobilen Arbeitsstationen zur Durchführung der rechen- und speicherintensiven numerischen 3D-PetroMod-Simulationen für Alaska North Slope und Hydrate Ridge und der globalen Gashydratabschätzungen. Letztere wurden mit hauseigenen 1D-Modellen für die angeschafften Software-Pakete Mathematica und Matlab realisiert.

Im Projektzeitraum wurden zudem mehrere internationale Workshops zur Vernetzung des Verbundprojektes durchgeführt. Mit Schwarzmeer-Anrainern wurde im März 2012 in Kiel ein möglicher zukünftiger Europäischen Feldtests im Donaudelta diskutiert sowie die hierzu notwendige Exploration, die zu den Expeditionen MSM 34 und 35 führte. Mit den südkoreanischen Kollegen fanden 2 Workshops in Kiel (März 2012) und Daejeon (Juli 2012) statt, auf denen eine mögliche deutsche Beteiligung am südkoreanischen Feldtest (Frühjahr 2015) diskutiert wurde. Dieser Plan ließ sich leider nicht realisieren. Erfolgreich verliefen dagegen die Kooperations-Workshops mit den taiwanesischen Kollegen (z.B. im September 2013 in Kiel, Februar 2014 in Bremen), die zu mehreren gemeinsamen Expeditionen führten, auf denen die taiwanesischen Vorkommen seismisch vermessen wurden (SO-227, OR5). Eine MeBo200-Bohrfahrt mit FS SONNE ist in Planung.

### **3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Alle geleisteten Arbeiten waren für das Erreichen der innerhalb von SUGAR II anvisierten Ziele notwendig und wurden angemessen ausgeführt.

Mit der Entwicklung erster Prozessingschritte zur Nachbearbeitung von Multibeam WCI Daten hatten die Projektpartner ein Alleinstellungsmerkmal geschaffen. Für wissenschaftliche Studien zum Aufstiegsverhalten von Gasblasen waren diese Ansätze aber noch nicht ausreichend. So haben Feldmessungen z.B. gezeigt, dass CO<sub>2</sub> Blasen deutlich

längere Aufstiegswege zurück legen können, als dies durch Lösungsmodelle vorhergesagt wurde. Durch die Weiterentwicklungen der WCI Technologie im Bereich der Sensorsteuerung, Visualisierung und Blasendetektion wurden in der zweiten SUGAR Phase die Grundlagen geschaffen, mit denen Verwirbelungen, Rotationen und Verschwenkungen der Aufstiegswege von einzelnen Blasen und Blasengruppen erkannt und bestimmt werden konnten. Erst durch diese Vermessungen wird es möglich Volumina und Verhalten von Blasenströmen in der Wassersäule weiter im Detail zu untersuchen. Dies wird Auswirkungen auf die Bestimmung von Gaseinträgen in die Atmosphäre im Wechselspiel mit Schichtungen und Strömungen in der Wassersäule haben, aber auch wichtige Aussagen zu Leckagedetektion von Pipelines oder Bohrungen ermöglichen.

Wie im Antrag dargelegt findet die Auswertung von Weitwinkel OBS Vermessungen im 3D Fall und für Horizontalkomponenten keine routinemäßige Anwendung. Für die umfassenden Explorationsaufgaben im Projekt SUGAR können hieraus jedoch wertvolle physikalische Parameter für eine Vorbeurteilung eines Hydratvorkommens abgeleitet werden. Die notwendigen Arbeitsschritte erfordern für die frei tauchenden OBS erhöhte Genauigkeiten in der Feststellung der Geräteposition am Meeresboden, die im 2D Fall weniger präzise ausfallen darf. In den Parametern der Modellierungssoftware ist diese Genauigkeit für die Krustenmodellierung bisher nicht verlangt, entsprechend musste eine Anpassung der Software erfolgen. Eine Auswertung konvertierter Scherwellen auf den Horizontalkomponenten der Seismometer benötigt zunächst eine Korrektur der Ausrichtungswinkel des Drei-Komponenten-Sensors. Diese kann nur analytisch erfolgen, da eine aktive Winkelmessung nicht eingerichtet ist. Im Weiteren ist die Entwicklung eines  $V_p$  Modells anhand der Hydrophon- oder Vertikalkomponenten (Kompressionswellen) Vorbedingung, um den Konversionshorizont festlegen zu können. Diese Vorarbeiten sind sehr zeitintensiv und erfordern ausreichende Fachkenntnis, weswegen sie nicht zur Routineauswertung zählen, für eine umfassende Analyse in der SUGAR Technologie aber notwendig sind.

Das für eine Testlokation im Projekt SUGAR als vielversprechendste Lokation in europäischen Gewässern heraus gestellte Donau Delta ist im wesentlichen durch Arbeiten von Popescu et al. (2006 & 2007), Baristeaş (2006) und die Projekte Assemblage und Blason bekannt. Popescu et al. und Baristeaş konnten auf Industriedaten zurück greifen, die heute aus lizenzrechtlichen Gründen nicht mehr zur Verfügung stehen. Die Projekt Assemblage und Blason haben das vorgesehene Arbeitsgebiet nicht erfasst. Aus diesem Grund war eine umfangreiche regionale seismische Vermessung im Fahrtabschnitt MSM34-1 notwendig. Erst daran konnten die Arbeitsfelder für die notwendigen Detailvermessungen festgelegt und als erstmalige akademische Erfassung des Donau Delta ausgeführt werden.

#### **4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

##### **A1-2:**

Bereits zu Projektende wurden neue Funktionen, die während der Projektlaufzeit erarbeitet wurden, in die bestehenden Fächerecholotanlagen erfolgreich integriert. Damit ist die Verwertbarkeit der Ergebnisse des Projektes bereits heute gegeben.

Des Weiteren erwarten wir einen zunehmenden Einsatz dieser neuen Technologie und der vorgestellten Nachbearbeitungsmöglichkeiten in der Anwendung von Fächerecholotmessungen, denn die Zunahme der Wassersäulendaten kann in diesem Bereich der Qualitätssicherung dienen und eignet sich besonders zur Untersuchung anthropogener Strukturen auf dem Meeresboden (Schneider von Deimling und Weinrebe, 2014).

## **A2-2:**

Nur mit den in der Projektphase SUGAR-II im Teilprojekt A2-2 geleisteten Arbeiten ist die Grundlage für eine seismische Beschreibung der Testlokation möglich. Die Vorauswertung der Messdaten ist bereits Grundlage für die Beantragung einer Bohrexpedition mit dem mobilen Bohrergerät MeBo geworden. Weitere Auswertungen werden Grundlage für die Modellierungen und Detailarbeiten im Teilprojekt 3 der SUGAR Phase III bilden.

Insbesondere der Datensatz im Arbeitsgebiet 2 hat mit seinem Potential zur Analyse von Hydrateinflüssen auf die Hangstabilität bereits das Interesse von Explorationsfirmen geweckt. Im Sinne einer Fortschreibung des Verwertungsplanes wird die Diskussion über ein von Fa. ExxonMobil finanziertes Forschungsprojekt geführt.

Auf wissenschaftlicher Ebene ist mit der Expedition MSM34 eine Kooperation mit dem IFREMER begründet worden. SUGAR Beteiligte werden im Gegenzug an der französischen Expedition GHASS in 2015 beteiligt sein.

## **A2-5:**

Das Interesse an der integrierten Auswertemethodik ist groß. So wurde Frau Jegen von der Society of Exploration Geophysicists (SEG, Houston USA) eingeladen, eine europäische Vorlesungsreihe an 14 verschiedenen Universitäten und Öl- und Gasfirmen über das Thema der elektromagnetischen und seismischen Datenintegration zu halten. In der 3. SUGAR Phase wird der 3D Modellierungs- und Inversionscode den industriellen Konsortialpartnern Terrasys und TEEC für Modellierungszwecke zur Verfügung gestellt um eigene integrierte Inversionsalgorithmen welche nicht nur für Methanhydratexploration sondern auch für die Öl- und Gasexploration von Interesse sind, zu entwickeln. Für Fragestellungen bei der Integration werden wir Ihnen beratend zur Seite stehen. Die in SUGAR I&II entwickelte elektromagnetische Expertise und die Integration von Elektromagnetik und Seismik bilden des Weiteren die Grundlage für die Gashydratexploration vor Taiwan. Es ist abzusehen, dass die Methode für zukünftige Gashydratexplorationsprojekte eine Schlüsselrolle spielen wird. Da im April 2013 die ersten Gashydratproduktionstest vor Japan erfolgreich verlaufen sind, ist es wahrscheinlich, dass die Methode auch von der Industrie aufgegriffen werden wird.

## **A3:**

Die oben vorgestellten Ergebnisse zeigen einen deutlichen Fortschritt bei der quantitativen Ermittlung submariner Gashydratvorkommen, sowohl auf globaler als auch regionaler Ebene, der im Rahmen dieses Projektes gemacht werden konnte. Insbesondere die Entwicklung des prognostischen Gashydratmoduls innerhalb der Beckensimulations-Software PetroMod® stellt nach derzeitiger Einschätzung der Lage auf dem Erdgas- und Erdölmarkt einen Wettbewerbsvorteil dar und führt nach Angaben von Schlumberger bereits jetzt zu verbesserten Vermarktungschancen auf diesem Sektor. Besonders zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass nach Aussage von Schlumberger sowohl Kunden aus dem industriellen als auch dem akademischen Bereich die Software gerade wegen der Möglichkeit der Gashydratsimulation gekauft haben. Nach unserer Kenntnis ist der hier verfolgte Ansatz weiterhin einzigartig, so dass der Vergleich zu „Arbeiten an anderen Stellen“ nicht möglich ist. Bereits erfolgte und geplante Veröffentlichungen sind nachfolgend aufgeführt.

## **5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,**

Im Laufe des Projektes hat es sich gezeigt, dass die 3D Visualisierungssoftware Fledermaus zum weltweiten Standard für die offline Darstellung von WCI Daten geworden ist. Im Verlauf

des Projektes wurde daher die Basis geschaffen die WCI Daten der ELAC Systeme in das Datenformat der Software Fledermaus übertragen zu können.

In bezug auf die Teilprojekte A2-2, A2-5 und A3 sind keine relevanten Erkenntnisse Dritter erfolgt.

## **6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.**

a) Artikel in internationalen Fachzeitschriften

Veröffentlicht:

Gentz, T., Damm, E., Schneider von Deimling, J., Mau, S., McGinnis, D. F., Schlüter, M. (2014) A water column study of methane around gas flares located at the West Spitsbergen continental margin. *Continental Shelf Research* 72, 107-118.

Gülzow, W., G. Rehder, J. Schneider von Deimling, S. Seifert, Z. Tóth (2013) One year of continuous measurements constraining methane emissions from the Baltic Sea to the atmosphere using a ship of opportunity. *Biogeosciences* 10, 81-99.

Haeckel M. (2011) Natürliche Gashydrate – potenter Energieträger und Option zur CO<sub>2</sub>-Speicherung. *Energie-Wasser-Praxis* 62(12), 104-109.

Haeckel, M., Wallmann, K. (2014) Marine Gashydrate: Erdgasgewinnung und CO<sub>2</sub>-Speicherung. *Econet Monitor* (Ausgabe März), 16-18.

Klaucke, I., Weinrebe, R. W., Linke, P., Klaeschen, D., Bialas, J. (2012) Sidescan sonar imagery of widespread fossil and active cold seeps along the central Chilean continental margin. *Geo-Marine Letters* 32, 489-499.

Krabbenhoft, A., Bialas, J., Klaucke, I., Crutchley, G., Papenberg, C., Netzeband, G. (2013) Patterns of subsurface fluid-flow at cold seeps: The Hikurangi Margin, offshore New Zealand. *Marine and Petroleum Geology* 39(1), 59-73.

Pinero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T., Schenk, O., Wallmann, K. (2014) Gas Hydrate Accumulations at the Alaska North Slope: total assessment based on 3-D Petroleum system modeling. 8<sup>th</sup> Conference on Gas Hydrates (ICGH8), Beijing (China) 28<sup>th</sup> July – 1<sup>st</sup> August.

Schmale, O., Walter, M., Schneider von Deimling, J., Sültenfuss, J., Walker, S., Rehder, G., Keir, R. (2012) Fluid and gas fluxes from the Logatchev hydrothermal vent area, *G<sup>3</sup>* 13(7), 1-12.

Schneider von Deimling, J., Papenberg, C. (2012) Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images. *Ocean Science* 8, 1-7.

Schneider von Deimling, J., Weinrebe, W., Tóth, Z., Fossing, H., Endler, R., Rehder, G., Spieß, V. (2013) A low frequency multibeam assessment: Spatial mapping of shallow gas by enhanced penetration and angular response anomaly. *Marine and Petroleum Geology*. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.02.013

Schneider von Deimling, Weinrebe, W. (2014) Beyond Bathymetry: Water Column Imaging with Multibeam Echo Sounder Systems. *Hydrographische Nachrichten* 97.

Sommer, M., Hölz, S., Moorkamp, M., Swidinsky, A., Heincke, B., Scholl, C., Jegen, M. D. (2013) GPU parallelization of a three dimensional marine CSEM code. *Computers & Geosciences* 58, 91-99.

Swidinsky, A., Hölz S., Jegen M. (2014). Rapid resistivity imaging for marine CSEM surveys with two transmitter polarizations: An application to the North Alex mud volcano, West Nile Delta. Accepted at *Geophysics*.

Wallmann, K., Pinero, E., Burwicz, E., Haeckel, M., Hensen, C., Dale, A. W., Rüpke, L. (2012) The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach. *Energies* 5, 2449-2498.

Wallmann K., Haeckel M., Bohrmann G., Suess E. (2011) Zukünftige kommerzielle Nutzung von Methanhydratvorkommen im Meeresboden. In: Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen & Risiken, Lozan J. L., Graßl H., Karbe L., Reise K. (eds.), Universität Hamburg, 285-288.

Wallmann K., Haeckel M. (2014) Gashydrate im Meeresboden : Erdgasgewinnung und CO<sub>2</sub>-Speicherung. *Geographie aktuell & Schule* 36 (207), 15-18.

In Vorbereitung:

Hölz, S., A. Swidinsky, M. Sommer, M. Jegen and J. Bialas, 2014. The Use of Rotational Invariants for the Interpretation of Marine CSEM Data with a Case Study from the North Alex Mud Volcano, West Nile Delta. In review at GJI.

Koch, S., Berndt, C., Bialas, J., Haeckel, M., Crutchley, G., Papenberg, C., Klaeschen, D. (in prep) Gas-controlled seafloor doming.

Krabbenhoef A., Bialas, J., Papenberg, C., Klaeschen, D. (in prep.) Mirror imaging with 3D OBS acquisition of Sevastopol Mud Volcano, Black Sea.

Leifer, I., E. Solomon, Schneider von Deimling, J., Coffin, R., Rehder, G., P. Linke (under revision) The Fate of Bubbles in a Large, Intense Bubble Plume for Stratified and Unstratified Water : Numerical Simulations of 22/4b Expedition Field Data, *Marine and Petroleum Geology*.

Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T., Wallmann, K. (in prep. a) 3-D Numerical modelling of methane hydrate accumulations using PetroMod: application to the Alaska North Slope.

Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T., Wallmann, K. (in prep. b) 3-D Numerical modelling of methane hydrate accumulations using PetroMod: Layer Cake Model.

Schmale, O., Leifer, I., Schneider von Deimling, J., Stolle, C., Krause, S., Kießling, K., Frahm, A. and Treude, T. (Eingereicht) The Bubble Shuttle Process: A gas bubble-mediated benthic-pelagic transport mechanism for methanotrophic microorganisms. *Limnology and Oceanography*.

Schneider von Deimling, J., P. Linke, M. Schmidt, G. Rehder (under revision) A mega methane gas plume with spiral vortex motion – insights about the abandoned Blowout site in the North Sea since 2005. *Marine and Petroleum Geology*.

b) Vorträge und Poster bei internationalen Konferenzen und Instituten

Berndt, C. (2012) Geophysical methods to quantify gas hydrates and free gas in the shallow subsurface: Review and Outlook, EAGE Workshop Geophysics for Unconventionals, Hamburg, Germany, 9 March 2012.

Bialas, J. and SO-191 Scientific Team, SO-214 Scientific Team (2012) 3D Seismic and multidisciplinary investigations of cold seeps along the Hikurangi Margin, North Island, New Zealand [Eingeladener Vortrag] In: 11. Conference on Gas in Marine Sediments, 04.-07.09.2012, Nice, France.

Bialas, J. (2012) Brennendes Wasser wird Erdgas: Wie heiß ist die Aktie Methanhydrat? [Eingeladener Vortrag] In: GAS2012 Fachkongress, 26.09.-28.09.2012, Vienna, Austria.

- Bialas, J. (2012) Brennendes Eis wird Erdgas: Methanhydrate auf dem Weg zur Rohstoffquelle [Eingeladener Vortrag] In: Seminar Geowissenschaften, CAU Kiel, 07.11.2012, Kiel.
- Dale, A. W., Haffert, L., Huetten, E., Crutchley, G., Greinert, J., De Haas, H., De Stigter, H. und Bialas, J. (2012) Geochemical processes and fluxes at a methane gas chimney on the Hikurangi Margin (New Zealand) [Vortrag] In: EGU General Assembly 2012, 22.-27.04.2012, Vienna, Austria.
- Greinert, J., Bialas, J., Klaucke, I., Crutchley, G., Dale, A. W., Rowden, A., Bowden, D., Linke, P., Sommer, S., de Haas, H., de Stigter, H., Faure, K. und Liebetrau, V. (2012) Methane seepage along the Hikurangi Margin offshore New Zealand: 6 years of multidisciplinary studies [Vortrag] In: AGU Fall Meeting 2012, 03.-07.12.2012, San Francisco, USA.
- Hölz S., A. Swidinsky and M. Jegen, 2013. The use of rotational invariants in the interpretation of marine controlled source electromagnetics. Marelec Conference, Hamburg, July 16<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup>, 2013.
- Jegen, M. S. Hölz, A. Swidinsky and C. Berndt, 2014. Electromagnetic and Seismic Investigation of Methane Hydrates Offshore Taiwan – The Taiflux Experiment. Extended Abstract at Oceans 2014, Taipeh, April 7<sup>th</sup> to April 10<sup>th</sup>.
- Klaucke, I., Bialas, J., Klaeschen, D., Zander, T., Papenberg, C., Dumke, I. und Koch, S. (2012) Subsurface fluid-flow patterns within the gas-hydrate stability zone of the Black Sea [Vortrag] In: GIMS11 Gas in Marine Sediments, 04.-06.09.2012, Nice, France.
- Klaucke, I., Zander, T., Klaeschen, D., Papenberg, C. und Bialas, J. (2012) Co-existence of gas hydrates and free gas in the Black Sea: High-flux versus low-flux areas [Vortrag] In: AGU Fall Meeting 2012, 03.-07.12.2012, San Francisco, USA.
- Koch, S., Crutchley, G., Dumke, I., Bialas, J., Klaeschen, D., Klaucke, I. und Papenberg, C. (2012) Multiscale study of seep structures - Opouawe Bank, offshore New Zealand [Poster] In: GIMS11, 11. Conference on Gas in Marine Sediments, 04.-07.09.2012, Nice, France.
- Krabbenhoft, A., Bialas, J., Crutchley, G., Papenberg, C., and the SUGAR working group: Localisation and quantification of gas-hydrate deposits, A2.2 OBS-seismics (Ocean-Bottom-Seismometer) - Anisotropy of the sub-seafloor with OBS-experiments, SUGAR Vollversammlung, 28./29.08.2012, MARUM Bremen.
- Krabbenhoft, A., Bialas, J., Klaucke, I., Crutchley, G., Papenberg, C. und Netzeband, G. (2012) Patterns of subsurface fluid-flow at cold seeps: the Hikurangi Margin offshore New Zealand [Poster] In: AGU Fall Meeting 2012, 03.-07.12.2012, San Francisco, USA.
- Piñero, E., Rottke, W., Fuchs, T., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K. (2012) 3-D numerical modelling of gas hydrate accumulations at the Alaska North Slope. Gordon Research Conference on Gas Hydrates 18-23 March, Ventura, CA (USA).
- Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T. and Wallmann, K. (2013a) Modelling Gas Hydrate Accumulations at the Alaska North Slope using PetroMod [oral]. 3P Arctic Conference. 15-18th October, Stavanger.
- Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Rottke, W., Fuchs, T., Wallmann, K. (2013b) New 3D modelling of methane hydrate accumulations in PetroMod: application at the Alaska North Slope. EGU General Assembly, 07-12th April, Vienna. EGU2013-4193.
- Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K., Rottke, W., and Fuchs, T. (2013c) 3-D Numerical modelling of the methane hydrate accumulations at the Alaska North Slope. EAGE. European Association of Geoscientists & Engineers. Invited talk for the Workshop on Gas Hydrates - From Geohazard to Resource, 9th June, London.

- Piñero, E. (2014a) Methane Hydrates: The Sugar project: 3D modeling of the Alaskan deposits. Invited talk at the Geological Survey of Spain (IGME).Madrid (Spain),17th February 2014.
- Piñero, E., Hensen C., Haeckel M., Rottke W., Fuchs T., Schenk O., Wallmann K. (2014b) Gas Hydrate Accumulations at the Alaska North Slope: total assessment based on 3-D Petroleum system modeling. 8th Conference on Gas Hydrates (ICGH8), Beijing (China) 28th July – 1st August 2014.
- Piñero, E., Crutchley, G., Berndt, C., Trehu, A. (2014c) Modeling 3D gas hydrate accumulations at southern Hydrate Ridge: role of faulting in gas migration through the GHSZ. 8th Conference on Gas Hydrates (ICGH8), Beijing (China) 28th July – 1st August 2014.
- Sommer, M., S. Hoelz and M. Jegen, 2013. Speeding up a marine CSEM code with GPGPU. Fifth international symposium on three-dimensional electromagnetics, Sapporo, Japan, May 7<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 2013
- Swidinsky, A. and M. Jegen, 2012a: An examination of petrophysically coupled joint inversions using marine controlled-source electromagnetic and seismic reflection data. SEG conference workshop, Las Vegas, USA, November 4-7 2012.
- Swidinsky A., C. Scholl & M. Jegen, 2012b: Determination of reservoir and rock physics parameters using a petrophysically coupled joint inversion of CSEM and seismic AVA data. EAGE conference, Copenhagen, Denmark, June 4-7 2012.
- Swidinsky A., S. Hölz & M. Jegen, 2012c: Rapid resistivity imaging using a transient marine CSEM survey with two transmitter polarizations. EAGE conference, London, UK, June 10<sup>th</sup>-13<sup>th</sup>, 2013 (extended abstract).
- Swidinsky A. and R.N. Edwards, 2013. Locating seafloor receivers using late time CSEM fields: Theory and application. Marelec Conference, Hamburg, July 16<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup>, 2013.

#### c) Berichte

- Bialas J., Klauke I., Haeckel, M. (2014) FS MARIA S. MERIAN Fahrtbericht / Cruise Report MSM-34 / 1 & 2 – SUGAR Site, GEOMAR Report 15, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, 109 p.
- McGinnis, D., Beaubien, S. E., Bigalke, N., Bryant, L. D., Celussi, M., Comici, C., De Vittor, C., Feldens, P., Giani, M., Karuza, A. und Schneider von Deimling, J. (2011) EUROFLEETS Cruise Summary Report. GEOMAR Report, Kiel, 55 pp. DOI10.3289/CR\_ECO2\_19835.