

Teilvorhaben: Prospektion und Exploration von Gashydrat-Lagerstätten

Hydroakustik (A1), Geophysik (A2-1), Elektromagnetik (A2-2), Modellierung (A4), Testfahrt (Z)

Zuwendungsempfänger: IFM-GEOMAR, Wischhofstraße 1-3, 24148 Kiel

Förderkennzeichen: 03G0687A

Laufzeit des Vorhabens: 1.5.2008 – 30.4.2011 (kostenneutrale Verlängerung bis 30.6.2011)

I. Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

### *A1 – Hydroakustik*

Gashydrate werden für die zukünftige Energieerzeugung eine bedeutende Rolle spielen. Eine Grundvoraussetzung für die Erschließung von Gashydrat-Lagerstätten sind zuverlässige Techniken, um diese zu erkennen und deren Ergiebigkeit zu analysieren. Nach neuen Untersuchungen ist die Genese von Gashydraten meist an die Verfügbarkeit von freiem Gas gekoppelt. Selbst aus festem Sediment steigen Gasblasen auf und können in die Hydrosphäre eintreten. Folglich ist in gashydrathaltigen Gebieten das Auffinden von Gasblasen in der Wassersäule ein starker Indikator für Hydratvorkommen im Untergrund. Gasblasen lassen sich mit modernen hydroakustischen Anlagen grob erfassen, jedoch waren die verfügbaren Techniken, und die meisten sind es bis heute, für eine systematische Erkundung und Analyse von Gashydrat-Lagerstätten nicht ausreichend. Ziel des Teilprojektes A1 (Hydroakustik) in SUGAR war deshalb, gemeinsam mit dem Projektpartner L-3 ELAC Nautik die Entwicklung neuartiger Datenerfassungs- und Datenbearbeitungs-methoden, um eine systematische Kartierung von Gasblasen in der Wassersäule zu ermöglichen. Die Arbeitsschwerpunkte am IFM-GEOMAR lagen hierbei auf der:

- a) Untersuchung zum Einfluss von Blasengröße, -komposition (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, Hydrathaut) und -verteilung auf das Rückstreusignal;
- b) Untersuchung zur Unterscheidung von Fremdsignalen von Gasblasen-Reflexionen;
- c) Entwicklung von Algorithmen zur Verbesserung der Erkennung von Gasblasen in der Wassersäule unter Berücksichtigung von (a) und (b) sowie der Adaption der bereits vorhandenen Software-Pakete für Visualisierungszwecke;
- d) Untersuchung zur Kartierung von Gasblasen-Aufstiegswegen, Entwicklung von Methoden zur Rückrechnung auf das Quellgebiet am Meeresboden, Berücksichtigung der Bathymetrie und Geologie des Quellgebiets.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erarbeitung und technischen Umsetzung einer geeigneten Schnittstelle zwischen den zu entwickelnden Erkennungsmethoden und der von dem Projektpartner L-3 ELAC Nautik zu entwickelnden Visualisierungssoftware.

Abschließend sollten die neuentwickelten Verfahren im Feldeinsatz bei Testfahrten erprobt und gegebenenfalls optimiert werden.

### A2-1 – Geophysik

Tiefgeschleppte Streamer (DTMCS) werden etwa 100 m über dem Meeresboden geschleppt (Abb. 1). Damit bieten sie gegenüber herkömmlichen Oberflächensystemen einen Auflösungs-vorteil durch den kleineren „Footprint“ (Breitzke und Bialas, 2003). Mit dem Einsatz einer üblichen Druckluftquelle (Airgun) an der Meeresoberfläche wird durch die große Schleppentfernung (ca. zweifache Wassertiefe) zudem ein unterschießen (Weitwinkelreflexion) stark reflektierender Meeresbodenstrukturen ermöglicht. Damit wird, z.B. bei Gasmigrationswegen, eine Abbildung der internen Struktur möglich, die bei einer Steilwinkelseismik durch den Blanking-Effekt nicht abgebildet wird.

In Deutschland gab es bisher keinen Hersteller für solche Systeme, die in größerer Wassertiefe eingesetzt werden können. Aufgabenstellung des Projektes war es, einzelne Hydrophonknoten für die digitale Datenerfassung seismischer Signale zu entwickeln. Die Knoten sollten modular verkettet werden können. Jeder Knoten musste mit einem Kompass und Tiefensensor ausgestattet werden. Die Gehäuse sollten im Wasser neutral ausbalanciert sein und bis 3000 m Wassertiefe einsetzbar sein. Für die Ansteuerung und eine Qualitätskontrolle war eine Steuerungs- und Übertragungssoftware zu entwickeln.

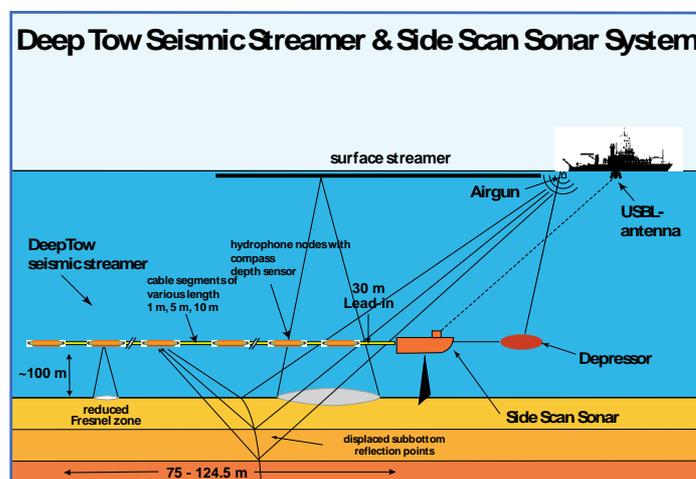


Abb. 1: Prinzipskizze des am IFM-GEOMAR entwickelten tiefgeschleppten geoakustischen Systems

### A2-2 – Elektromagnetik

Die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> in Gashydratschichten erfordert detaillierte Kenntnisse über die Verteilung von Gashydraten im Meeresboden. Technologien und Messsysteme zur Methanhydratquantifizierung, welche auch zur besseren Abschätzung der in Hydratform

gespeichert Energiereserven benötigt werden, sind weltweit im Aufbau begriffen. Die Existenz von Gashydraten kann anhand strukturell hochauflösender seismischer Messungen durch ein an der Hydratschichtunterkante erzeugtes Signal, dem sogenannten Boden-simulierenden Reflektor (BSR), nachgewiesen werden. Die erfolgversprechendste Methode zur Quantifizierung von Gashydraten ist jedoch die aktive Elektromagnetik oder auch Controlled Source EM (CSEM). Hier wird mittels elektromagnetischer Sender und Empfänger die durch Methanhydrate hervorgerufenen Widerstandsanomalien in dem ansonsten gut leitfähigen Meeresboden das Methanhydratvolumen abgeschätzt. Da Methanhydrate nicht gleichmäßig, sondern gehäuft an Störungzonen im Meeresboden vorkommen, muss dies zwangsläufig in 3D erfolgen. Hauptaufgabestellung am IFM-GEOMAR ist die Entwicklung mariner Messtechniken, mit denen die notwendigen hochauflösenden 3D elektromagnetischen Datensätze aufgenommen werden können. Desweiteren muss eine angepasste 3D Datenanalysestrategie und Dateninterpretationsansätze entwickelt werden. Dies ist für die 2. Phase in SUGAR geplant, jedoch konnten Restmittel in einer 3 monatigen Verlängerungsphase zur Entwicklung erster Ansätze benutzt werden.

#### *A4 – Modellierung*

Das Teilprojekt A4 hatte zum Ziel, submarine Gashydratmengen zu quantifizieren sowie ihre Verteilung in den Sedimenten zu prognostizieren. Im Vordergrund stand dabei die Entwicklung numerischer Modelle zur Abbildung der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Gashydratvorkommen, womit Voraussagen hinsichtlich ihrer Entstehung und Stabilität möglich sind. Hierzu sollte gemeinsam mit dem Schlumberger Aachen Technology Center (AaTC), vormals IES, ein Modul für die Beckensimulations-Software PetroMod® entwickelt werden, was speziell die Entwicklung hochaufgelöster, dreidimensionaler Modelle erlaubt.

#### *Z – Testfahrt*

In den Teilprojekten A1 und A2 wurden neue Gerätschaften (Multibeam, tiefgeschleppter Streamer (DTMCS), stationäre und geschleppte Geräte der Elektromagnetik (CSEM)) entwickelt. Die Funktionalität und Kalibrierung der Systeme ist in den Teilprojekten anhand von Demonstrationsgeräten, die durch die Institute anzuschaffen waren, erfolgt. Dabei handelt es sich um geoakustische bzw. elektromagnetische Systeme, deren Funktionsweise nur eingeschränkt im Labor geprüft werden kann. Um die volle Einsatzfähigkeit und Kompatibilität mit den Schiffseinrichtungen zu sichern, war es daher notwendig die Geräte auf einer Testfahrt zu überprüfen.

Die Expedition sollte zugleich genutzt werden, um möglicherweise ergänzende Daten aus einem Gashydratfeld zu gewinnen. Vorrangig war jedoch die Kenntnis des Gebietes, um die Messwerte besser einordnen zu können. Während der Projektentwicklung wurde für diesen Zweck der

norwegische Kontinentalrand als zielführendstes Gebiet angesehen. In dieser Region sind Gashydratvorkommen bekannt und erste CO<sub>2</sub>-Sequestrierungen werden im Feld Sleipner ebenfalls durchgeführt. Die Projektbereiche in SUGAR-B sehen hier auch ein ideales Feld, in dem später Feldversuche durchgeführt werden können. Als geeignete und kurzfristig zu beantragende Plattform wurde hierfür das FS POSEIDON gewählt. Leider hat die Fahrtplanung für POSEIDON eine Umsetzung der Pläne in Norwegen während der Projektdauer von SUGAR nicht ermöglicht. Als Alternative wurde daraufhin der Donaufächer im Schwarzen Meer gewählt. Hier sind Blasenaustritte am Schelfhang und mehrfache BSR in der Tiefsee bekannt. Die Entfernungen der Lokationen untereinander sind so kurz, dass ein wiederholter Wechsel des Standorts während der Reise möglich ist und somit auf wiederholte Tests eingegangen werden kann.

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

### *A1-1 – Hydroakustik*

Im Rahmen der beiden BMBF-geförderten (Geotechnologien-Programm) Gashydratprojekte LOTUS und COMET untersuchte IFM-GEOMAR u. a. Methangasaustritte an Gashydratführenden Sedimenten. So konnten Greinert et al. (2006) mit dem 50 kHz-System ELAC SEABEAM 1050 im Schwarzen Meer austretende „Gasflares“ kartieren und Rehder et al. (2002) das Aufstiegsverhalten von hydratisierten Gasblasen charakterisieren. Seit 2001 wurde in enger Kooperation zwischen L-3 ELAC Nautik und IFM-GEOMAR der GasQuant entwickelt. Dieses adaptierte SEABEAM System kann am Meeresboden verankert werden, um Gasblasen aufzuspüren. In mehreren Seegebieten konnten anhand der GasQuant-Daten Gasblasenaustritte am Meeresboden in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung nachgewiesen werden (z. B. Pfannkuche et al., 2005). Die prinzipielle Fähigkeit der SEABEAM Anlage, Gasblasen in der Wassersäule zu lokalisieren, wurde in einer Gemeinschaftsarbeit von L-3 ELAC Nautik und IFM-GEOMAR demonstriert (Schneider v. Deimling et al., 2007). Alle Arbeiten haben gezeigt, dass die Hardware der neueren Fächerecholote in der Lage ist, Daten aus der Wassersäule aufzuzeichnen, es fehlte jedoch geeignete Software zur routinemäßigen Bearbeitung der Messdaten. Die anfallenden Datenmengen waren so groß, dass eine konventionelle Auswertung unmöglich war. Bereits auf dem Markt verfügbare und inzwischen ausgereifte Software zur Untersuchung akustischer Daten gibt es im Bereich der seismischen Datenverarbeitung. In den letzten Jahren wurden im Gebiet der Seismischen Ozeanografie am IFM-GEOMAR erhebliche Erfolge erzielt, bei denen akustische Echos in der Wassersäule erfasst, bearbeitet und analysiert wurden.

Das während LOTUS und COMET gewonnene Fachwissen einerseits und die Erfahrung im Bereich der seismischen Datenverarbeitung in der Seismischen Ozeanografie andererseits sollte genutzt werden, um Algorithmen zu entwickeln, welche die Gasblasen in Echtzeit

aufspüren, sicher von Fremdechos unterscheiden und ggfs. klassifizieren können und sie schließlich visuell darzustellen.

#### *A2-1 –Geophysik*

International war nur eine US amerikanische Firma bekannt, die ein entsprechendes System herstellt. Ein solches System wurde am IFM-GEOMAR eingesetzt. Die Empfänger-komponenten haben jedoch im Betrieb gravierende Mängel gezeigt, die einen fortdauernden Betrieb nicht ermöglichen. Für das neue System mussten wesentliche technische Komponenten dem Einsatzfeld und –bedingungen angepasst werden. Hierfür wurden auftriebsneutrale, strömungsgünstige Druckgehäuse gefordert, die korrosionsresistent sind. Die entsprechende Digitaltechnik für die modulare Kettenbildung der Hydrophonknoten war neu zu entwickeln. Für die Systemsteuerung und Qualitätskontrolle sollten vorhandene Telemetriem und seismische Datenerfassungssoftware genutzt werden. Die Steuerung des Datenflusses, die Anzeige von Kontrollwerten (Seiten- und Tiefenlage) und eine online Darstellung ausgewählter Hydrophonkanäle war in das System zu integrieren. Nur wenige deutsche Firmen verfügen über das notwendige Know-how im maritimen Apparatebau und digitaler Echtzeitübertragung, um ein solches Projekt umzusetzen. Die wirtschaftliche Struktur dieser Betriebe erlaubte es nicht, eine partnerschaftliche Projektentwicklung zu betreiben. Die Aufgaben konnten nur als Auftragsarbeit gelöst werden.

#### *A2-2 – Elektromagnetik*

Die marine Elektromagnetik ist ein recht junges Arbeitsfeld, das erst in den letzten 10 Jahren stark kommerzialisiert wurde. Treibende Kraft hinter der Kommerzialisierung ist, dass anhand elektromagnetischer Daten Aussagen über die Existenz von Gas und Öl in potentiellen Reservoirs abgeleitet werden können, womit das Risiko einer teuren trockenen Bohrung verringert werden kann. Bisher gibt es wenige oder keine Standards, weder bei der Hardware, noch in der Datenanalyse, auch weil die Markanteile hart umkämpft sind und verschiedene Firmen in einem erbitterten Patentstreit verwickelt sind. Daher können marine, elektromagnetische Instrumente in der Regel nicht kommerziell erworben werden und die meisten Neuentwicklungen erfolgen weiterhin im universitären Umfeld. Innerhalb Europas ist die derzeit aktivste und größte Gruppe die seit 6 Jahren bestehende Gruppe am IFM-GEOMAR, innerhalb von Nordamerika sind es die alt eingesessenen Gruppen am Scripps in Kalifornien und an der University of Toronto in Kanada, in Asien sind die japanischen Institute University of Tokyo, Jamstec und University of Kobe Spitzenreiter in technologischen Neuentwicklungen. Während der letzten 10 Jahre hat Frau Marion Jegen Entwicklungen an marinen, elektromagnetischen Empfängern für tieffrequente, passive elektromagnetische, sogenannte magnetotellurische, Messungen mit der Firma Magson GmbH in Berlin Adlershof durchgeführt.

Die Zusammenarbeit basierte auf dem Kauf hochsensitiver Fluxgate-Magnetometer, welche Magson für die Raumfahrtforschung herstellt und für marine, magnetotellurische Messungen benötigt werden. Die Zusammenarbeit weitete sich dann auf die Entwicklung von elektromagnetischen Datenloggern aus. Für die Bandbreitenentwicklung musste der Datenlogger verändert und ein Demonstrator gebaut werden. Die wirtschaftliche Struktur dieses Betriebes erlaubte jedoch nicht, eine partnerschaftliche Projektentwicklung zu betreiben. Die Aufgabe der Bandbreitenerweiterung konnte nur als Auftragsarbeit gelöst werden.

Auch eine integrierte Datenanalyse (joint inversion) seismischer und elektromagnetischer Daten, mit der ein großer Informationsmehrgewinn gegenüber getrennter Datenanalyse erzielt werden kann, ist nicht kommerziell zu erwerben. Joint Inversion ist ein neues Forschungsgebiet, an dem sowohl in der Industrie als auch an akademischen Instituten sehr aktiv geforscht wird. Das kommerzielle Interesse ist groß, was die Finanzierung von Forschungsarbeiten, auch am IFM-GEOMAR, durch die Industrie dokumentiert. Joint Inversion ist jedoch ein technologisch sehr anspruchsvolles Feld, da es sowohl tiefes Verständnis der zu verknüpfenden geophysikalischer Methoden erfordert als auch hohe Ansprüche an mathematische und programmiertechnische Fähigkeiten stellt.

Sowohl die Hardware- als auch die Softwareentwicklung, die im SUGAR-Projekt geleistet wurde, profitierten von parallel laufenden Projekten: In dem von Wintershall geförderten Bau einer Flotte tieffrequenter, magnetotellurischer Empfänger (TIMBA-Projekt), in der von RWE-DEA geförderten Forschung an Schlammvulkanen im West-Nil Delta (WND-Projekt), inklusive Bau einer elektromagnetischen Quelle, sowie die durch ein internationales Ölfirmen-Konsortium geförderte Forschung von joint inversion seismischer, magneto-tellurischer und gravimetrischer Daten.

#### *A4 – Modellierung*

Die Rahmenbedingungen zur Durchführung dieses Projektes waren (und sind) sehr gut. Die Beckensimulations-Software PetroMod® der AaTC ist weltweit ein Standard in der Öl- und Gasexploration, wodurch ein umfangreiches Know-how auf dem Gebiet der 3-D Simulation komplexer, geologischer Abläufe besteht. Dieses wird durch die langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Gashydratforschung seitens des IFM-GEOMAR optimal ergänzt. Alle notwendigen Arbeitsmittel standen seit Projektbeginn zur Verfügung.

#### *Z – Testfahrt*

Popescu et al. (2006) haben Daten entlang mehrerer seismischer Profile im Bereich des Schelfs und der Tiefsee am Donau-Fächer im Schwarzen Meer publiziert. Oberhalb der Gashydratstabilität ist eine Vielzahl von aktiven Gasaustritten kartiert worden.

Ein Überfahren dieser Gebiete mit einem mobilen Multibeam der Fa. ELAC Nautik und eine hochauflösende Neukartierung (Doppel-Ping-Verfahren) wird die dreidimensionale Aufnahme der Gasfahnen im Water-Column-Imaging ermöglichen. Der Datensatz bietet im Vergleich der bisher vorhandenen Aufnahmen eine ideale Gelegenheit, die Leistungsfähigkeit der WCI-Auswertung zu testen und die Kontinuität der früher kartierten Austritte zu bewerten.

Unterhalb des Schelfs wurden 2 Gebiete mit BSR-Signaturen kartiert. Diese zeigen zum Teil mehrfach überlagerte BSR-Strukturen. Eine wiederholte Vermessung dieser Bereiche mit dem tiefgeschleppten Streamer wird bei verbesserter lateraler Auflösung eine detailliertere Abbildung der BSR-Reflektoren erlauben. Ein engmaschig angelegtes Profilgitter wird dabei auch die räumliche Ausdehnung der mehrfach übereinander abgebildeten BSR aufzeigen. In Verbindung mit der aktiven Elektromagnetik (CSEM) wird die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeiten gleichzeitig kartiert werden. Durch die gemeinsame Interpretation beider Datensätze wird ein detailliertes Bild der Porosität und Gasführung und Verteilung von Gashydraten im Untergrund erstellt, das weitere Erkenntnisse zum Verständnis des Bildungsprozess dieser außergewöhnlichen BSR-Anordnung liefert.

Der Fahrtantrag für FS POSEIDON wurde im Januar 2009 eingereicht und in erster Beurteilung bewilligt. Laut Rücksprache mit der Schiffseinsatzleitung waren für den Mittelmeerraum wesentlich mehr Absichtserklärungen für Forschungsfahrten bekannt als für Norwegen. Aus diesem Grund wurde anstelle des ursprünglichen Fahrtzieles Norwegen das Schwarze Meer ausgewählt, da hier eine zügige Eingliederung in den Fahrplan erfolversprechender war. Dennoch konnte die Fahrt erst im Dezember 2010 realisiert werden. FS POSEIDON wurde dazu extra von der Werft in Kiel auf Transit ins Schwarze Meer geschickt.

Die zu testenden Komponenten des ELAC Multibeams waren bis zu diesem Zeitpunkt bereits auf Testeinsätzen von ELAC Nautik geprüft worden. Die Kooperation mit ELAC und der Einsatz hauseigener Mittel des IFM-GEOMAR haben in 2010 den festen Einbau dieser Anlage in das FS POSEIDON ermöglicht. Die Testfahrt ist der erste Einsatz dieses nun bordeigenen Systems geworden. Die Entwicklung der stationären CSEM-Geräte war bereits früh abgeschlossen, so dass diese Systeme bereits im Projekt WND zum Einsatz kamen und ihre Systemtauglichkeit beweisen konnten und hier nicht mehr zum Einsatz kommen mussten. Das geschleppte CSEM-System der BGR wurde ebenfalls früher getestet. Die Testfahrt wurde zusätzlich für weitere Kalibrierungen und Noise-Tests genutzt. Die Fertigung der Komponenten des tiefgeschleppten Streamers wurde rechtzeitig abgeschlossen. Teilweise konnten Einzelsegmente bereits in der Kieler Förde getestet werden. Ein kompletter Aufbau unter Verwendung eines Tiefseekabels erfolgte erst an Bord der POSEIDON.

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

#### *A1-1 – Hydroakustik*

Der Projektablauf hat sich ohne Änderung an der Vorplanung orientiert. Zunächst wurden mit dem Projektpartner L-3 ELAC Nautik die notwendigen Konventionen bezüglich Daten-Formate, Programmier-Plattform usw. abgesprochen, um in einer „gemeinsamen Sprache“ zu kommunizieren und um die spätere Integration der Bearbeitungsalgorithmen in das System zu vereinfachen. Mit Hilfe eines ersten vereinfachten Datensatzes wurden grundlegende methodische Ansätze entwickelt und getestet. Im Wesentlichen konzentrierten sich die Arbeiten auf die Erkennung von Gasblasen und deren Unterscheidung von Störsignalen, wie z. B. Seitenechos und Fischen, wobei hier wiederum der Schwerpunkt auf der eigentlichen Datenverarbeitung und Signalverbesserung lag. Eine methodische Klassifizierung der Gasblasen kann erst im Anschluss folgen um ggfs. Aufschluss über Blasengröße, -komposition und -verteilung zu geben. Hierfür sind jedoch geeignete Datensätze erforderlich, die in zukünftigen Tests und Erprobungsfahrten gesammelt werden müssen. Die erste Felderprobung des Gesamtsystems wurde im Rahmen der SUGAR Testfahrt mit FS Poseidon im Dezember 2010 absolviert. Hierbei wurde erstmals zeitgleich zur Meeresbodenkartierung gezielt ein vollständiger Datensatz innerhalb der Wassersäule über ein bekanntes Gasblasenaustrittsfeld gesammelt (WCI Daten: Water Column Imaging). Die entwickelten Routinen zur Blasenerkennung konnten an diesem Datensatz getestet und optimiert werden. Ein weiterer Datensatz über ein bekanntes Gasaustrittsfeld wurde im März 2011 während der Reise SO-214 NEMESYS vor Neuseeland gewonnen.

Die entwickelten Algorithmen konnten erst mit Hilfe dieser Daten zum Teil erfolgreich getestet und optimiert werden. Diese Daten zeigten aber auch, daß bereits entwickelte methodische Ansätze neu überdacht und sogar neu entwickelt werden mussten. Darüber hinaus führte die erfolgreiche Auswertung dieser Daten zu neuen Ansätzen, die bereits in der Antragsstellung zur 2. Phase des SUGAR Projektes formuliert wurden.

#### *A2-1 – Geophysik*

Der Projektablauf hat sich ohne Änderungen an der Vorplanung orientiert. Zunächst wurde in Abstimmung mit der Auslegung der Schaltkreise, der Sensorik (Hydrophon, Drucksensor, Kompass) und des Standardmaterials für die Druckgehäuse die Dimensionierung der Hydrophonknoten festgelegt. Besondere Beachtung wurde hier einer strömungsgünstigen Gehäuseform gewidmet. Anschließend konnten Programmierung und Einzelgewerke parallel entwickelt werden. Dabei wurden die Konfektionierung der Hydrophone und der Drucksensoren im Unterauftrag vergeben. Die Programmierung der digitalen Datenerfassung im Hydrophonknoten erfolgte mit Blick auf die Rahmenbedingungen des Datenprotokolls, welches für den Signalfluss in der gesamten Messkette zu definieren war. Eine Schwierigkeit lag in der

exakten Zeitsteuerung, die eine Synchronisierung des externen Schusstriggers mit den einzelnen A/D-Wandlern der Hydrophonknoten erfordert. Ebenso wurde eine automatische Enderkennung in die Knoten implementiert, die eine Funktionsfähigkeit der Restkette sicherstellt, wenn ein Segment ausfällt. Für Testzwecke wurden zunächst drei Hydrophonknoten entwickelt und die entsprechenden Gehäusekomponenten aufgebaut. Bei einer Tagesfahrt in der Kieler Förde wurde mit diesen Prototypen das Systemkonzept getestet und die Funktionalität nachgewiesen. Anschließend erfolgte die Fertigung der Gesamtkette und die abschließende Programmierung der graphischen Steuerungssoftware. Parallel wurde die online Datenübergabe an die vorhandene Standard Streamersoftware zur Qualitätskontrolle an Bord implementiert. Eine Felderprobung des Gesamtsystems wurde im Rahmen der SUGAR-Testfahrt mit FS POSEIDON im Dezember 2010 absolviert. Aufgabe während dieser Reise war die Anpassung der Schnittstellen von Überwasser- und Unterwassereinheiten an die mehrere Kilometer lange Datenstrecke des Tiefseekabels. Nach den Justierarbeiten konnten erste seismische Signale aufgezeichnet werden. Eine Profilfahrt fiel dem schlechten Wetter zum Opfer. Ein erstes Profil wurde während der Reise SO-214 NEMESYS über Methanaustritten vor Neuseeland erfolgreich vermessen.

#### *A2-2 – Elektromagnetik*

Durch Methanhydrate erzeugte elektrische Widerstandsveränderungen im Meeresboden können anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Deformation einer elektro-magnetischen Welle bestimmt werden. Dazu wird an einer Senderantenne eine Welle mit bekannter Form erzeugt und mit der an Empfängerantennen gemessenen Welle verglichen. Um hochauflösend die 3D Verteilung von Methanhydraten zu bestimmen, wurde ein System konzipiert, in dem Empfängerantennen in einem 3D Netz auf dem Meeresboden stationär angeordnet werden und von einer Senderantenne von verschiedenen Positionen aus angestrahlt werden. Diese Raumverteilung der Sender und Empfänger erlaubt eine tomographische, und damit für 3D Anomalien ideale Messanordnung, die Stationarität der Empfänger ermöglicht eine genaue Abstandsbestimmung und damit Datengenauigkeit zwischen Quelle und Empfänger. Für die erforderliche Auflösung ist es weiterhin wichtig, Wellen in möglichst vielen Frequenzen und damit verschiedenen Eindringtiefen zu messen.

Eine große Bandbreite kann durch das Senden eines Rechtecksignals und der Messung des Empfängersignals mit hoher Abtastrate ( $> 1$  kHz) erreicht werden. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines solchen Empfängers für aktive Elektromagnetik. Das Design baut auf einem am IFM-GEOMAR vorhandenen Empfängertyp mit geringer Abtastrate (10 Hz) auf, der für tiefeindringende, passive Erkundungen mit natürlich variierendem Quellsignal benutzt wird (Magnetotellurik). Die Bandbreitenerweiterung wurde von der Firma Magson, welche auch den

vorhandenen Empfänger gebaut hat, in Absprache mit IFM-GEOMAR entwickelt. Weiterhin sollten erste Interpretationsansätze der tomographischen Daten untersucht werden.

Die Zielsetzung des Vorhabens wurde, auch durch glückliche Umstände, weit übertroffen. Anstatt einer einfachen Bandbreitenerweiterung der Empfängerelektronik, wurde innerhalb des Projektes ein Dualsystem entwickelt, das sowohl die in 10 kHz Takt abgetastete aktive als auch die kleiner als 10 Hz abgetasteten, passiven elektromagnetischen Signale messen kann. Eine Umschaltung vom passiven in den aktiven Modus erfolgt durch ein akustisches Signal vom Schiff aus. Diese Hybridgeräte erlauben damit sowohl eine hochauflösende, flache Erkundung (Eindringtiefe im Hundertmeterbereich) als auch eine tiefe Erkundung (Eindringtiefe im 10er Kilometerbereich).

Die entwickelte Technologie konnte, anstatt in nur einen einzelnen Empfänger, in insgesamt 20 Instrumente eingebaut werden, die zeitgleich in einem parallelen von Wintershall geförderten Projekt, TIMBA, gebaut wurden. Das tomographische EM-System konnte weiterhin im Rahmen des von RWE-DEA geförderten WND-Projekts auf einer durch einen Schlammvulkan hervorgerufenen 3D Anomalie getestet werden (leider war innerhalb von SUGAR keine Testfahrt wegen Schiffszeitknappheit möglich). Die entwickelte Technologie hat einwandfrei funktioniert und die aufgenommenen Daten zeigen eine hervorragende Qualität.

Auch in der Entwicklung von Auswertungsverfahren wurden große Fortschritte gemacht. Ein 3D Modellierungscode für Landelektromagnetik (Arnason, 1999) konnte auf marine Elektromagnetik angepasst werden. Der Code wurde dabei auf Graphical Processor Units parallelisiert und die für 3D elektromagnetische Modellierungen typischen, großen Rechnerzeiten um ein vielfaches verringert (Faktor 2 bis 20, je nach Modellgröße) werden. Damit steht jetzt die für tomographische Daten erforderliche 3D Modellierungssoftware zur Verfügung. Desweiteren wurden erfolgreich erste Strategien zur Integration von seismischen und elektromagnetischen Daten anhand von 1D Modellen entwickelt und auch testweise auf Schlammvulkandaten angewandt.

#### *A4 – Modellierung*

Der zeitliche Ablauf des Projektes entsprach weitestgehend dem des Antrags. Anfängliche Verzögerungen im Ablauf, die daraus entstanden waren, dass zunächst keine geeigneten Mitarbeiter eingestellt werden konnten, konnten im weiteren Verlauf schnell aufgeholt werden.

#### *Z – Testfahrt*

Die Fortschreibung des Fahrplanes für das FS POEIDON hatte, wie erwartet, eine hohe Nachfrage im Bereich Mittelmeer erbracht. Dennoch ist es nicht gelungen die Testfahrt früher als Dezember 2010 umzusetzen. Dank der Entwicklung und Kooperation mit anderen Projekten konnten aber bereits teilweise frühere Ersatztermine gefunden werden. Nach der

Werftüberholung im Herbst 2010 in Kiel wurde FS POSEIDON mit einer Transitreise ins Schwarze Meer überführt. Ein Zwischenstopp in Southampton ermöglichte die Übernahme und Installation der CSEM-Winde direkt am SOC. Da die bordeigenen Winden keine ausreichenden Drahtlängen für den Einsatz des tiefgeschleppten Streamers speichern können, wurde die Winde auch für dieses System vorgesehen.

Da POSEIDON nur begrenzten Platz für Wissenschaftler (10) und Gerät bietet, wurde eine Teilung der Fahrt vorgesehen. Am 07.12.2010 begann der erste Abschnitt mit der Erprobung des ELAC Multibeam und des tiefgeschleppten Streamers. Ein Hafenaufenthalt am 15.12.2010 beendete den ersten Abschnitt. Wissenschaftler der Gruppe um den tiefgeschleppten Streamer gingen von Bord. Die Mannschaft der BGR nahm die freien Plätze mit dem geschleppten CSEM-System ein. Ein Betreuer für das Multibeam verblieb an Bord.

Eine Kalibrierung des Multibeam schlug zunächst fehl. Unbekannte Softwarefehler führten zu einer Fehlübertragung der Daten an den Steuerungsrechner. Nach Rücksprache mit ELAC Nautik konnte das System neu initialisiert werden. Die Einrichtung der WCI Software erfolgte auf einem zusätzlichen Rechnersystem, das per Netzwerk mit dem Kontrollrechner verbunden wurde, um eine permanente Datenübertragung zu ermöglichen. Eine Online Darstellung der Wassersäulendaten ist gelungen. Gleichzeitig wurden Schwachstellen der Software und des Datenhandling aufgezeigt, die in der zweiten SUGAR Phase bearbeitet werden. Im Laufe der beiden Fahrtabschnitte konnte der größte Teil des Donaugrabens vermessen werden. Gasblasenaustritte an der Flanke wurden im Online Viewer erfasst und in einer dreidimensionalen Karte abgebildet.

Der tiefgeschleppte Streamer wurde an Bord erstmals mit einem Tiefseekabel verbunden. Testeinsätze wurden genutzt, um die Telemetrie zu kalibrieren. Weitere Einstellungen wurden an der Kommunikationsschnittstelle von Bordrechner und Systemrechner im Schleppfisch durchgeführt. Das grundlegende Konzept des Systems hat sich dabei bewährt. Die Lage der Messkette im Wasser war durch die neuen Gehäuse und Auftriebe gut austariert. Eine abschließende Profilvermessung konnte nicht stattfinden, da durch stürmisches Wetter (bis Bft. 12) an mehreren Tagen keine Außenarbeiten möglich waren.

Das geschleppte CSEM-System wurde bereits früher getestet. Auf dieser Testfahrt konnte erstmalig die volle Länge von 700 m für die Empfangsdipole montiert werden. Weitere Tests wurden mit verkürzten Kabeln durchgeführt, um verschiedene Abschirmungen zur verbesserten Rauschunterdrückung zu testen. Die Reise wurde mit der Vermessung eines CSEM Profils beendet. Insgesamt wurde der Fahrtverlauf stark durch schlechtes Wetter (bis 12 Bft.) eingeschränkt, so dass an mehreren Tagen nicht an Deck gearbeitet werden konnte.

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

##### *A1-1 – Hydroakustik*

Die seit ca. 30 Jahren eingesetzten Fächerecholotsysteme brachten einen bedeutenden Fortschritt gegenüber herkömmlichen Echoloten bei der Vermessung der Meeresböden. Einen entscheidenden Anteil bei der Entwicklung dieser Systeme hatte die Firma SEABEAM, heutige Schwesterfirma des Projektpartners L-3 ELAC Nautik. Fächerecholotsysteme gehören auch heute noch zu den herausragenden Spitzenprodukten der Hydroakustik; weltweit gibt es zurzeit nur vier namhafte Hersteller solcher Systeme; zwei davon (L-3 ELAC Nautik und Atlas Hydrographic) haben ihren Sitz in Deutschland. Die bisherigen Systeme waren ausgelegt und optimiert für die genaue Bestimmung der Tiefe des Meeresbodens. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung, insbesondere im Bereich der digitalen Datenerfassung und –speicherung, wurden die Anforderungen einiger Systeme bereits auf die Erfassung von Daten innerhalb der Wassersäule erweitert, um somit z. B. auch Fischschwärme lokalisieren zu können.

Eine weitere vielversprechende Anwendung sah man im Bereich der Gashydrat-Forschung. Die Gashydrat-Forschung hat im vergangenen Jahrzehnt stark zugenommen und es wurden gezielt Untersuchungen an Gasblasenaustrittsstellen durchgeführt, um deren Rolle im Gesamtsystem der Hydratlagerstätte besser verstehen zu können. Somit wurde schnell klar, dass vom Sediment aufsteigende Gasblasen ein klares Indiz für Hydratvorkommen darstellen können. Gasblasen innerhalb der Wassersäule sind hervorragende akustische Reflektoren und somit ideal von Echolotsystemen zu erfassen. Die großflächige Kartierung des Meeresbodens und die Auffindung von Gasblasenaustritten mittels Fächerecholot-systemen stellt demnach eine wichtige und frühe Komponente zur Erschließung von möglichen Hydratlagerstätten dar.

##### *A2-1 – Geophysik*

Tiefgeschleppte geoakustische Systeme werden in vielfältiger Weise in der Forschung und Industrie eingesetzt. Am häufigsten eingesetzt werden dabei Sidescan und Sub-Bottom Profiler Systeme. Neben Fragen der hochauflösenden Sedimentkartierung für wissenschaftliche Zwecke (Habitatkartierung, Sedimentablagerungen, Hangstabilitäten, etc.) stellt in der geotechnischen Anwendung die Aufnahme des Meeresbodens für Unterwasserkonstruktionen (Pipelines, Plattformen) und Baggerarbeiten eine Hauptanwendung dar (Tokarev et al., 2008). Diese Arbeiten finden in der Regel in wenigen hundert Metern Wassertiefe statt. Arbeiten bis in 3000 m Wassertiefe werden nur zu wissenschaftlichen Zwecken durchgeführt. Dafür geeignete Systeme wurden bisher in entsprechenden Forschungslaboren entwickelt und als Einzelstücke gebaut. Bekannt sind hier das amerikanische DTAGS (Gettrust and Ross, 1990) mit Mehrkanalstreamer und das französische PASISAR (Savoye et al., 1995) mit Einkanalhydrophon und Sidescan. Dementsprechend ist nur ein Anbieter (HighTech) aus den USA bekannt, der hierfür geeignete

Sensorik anbietet, die aus der Entwicklung mit dem Naval Research Laboratory (NRL) entstanden ist (Gettrust et al., 2004). Die Systemsteuerung und Datenführung ist dabei nicht für einen Parallelbetrieb von Streamer, Sidescan und Sub-Bottom Profiler ausgelegt. Eine entsprechende Steuerung wurde in einem früheren Projekt (INGGAS) am IFM-GEOMAR entwickelt und erfolgreich betrieben (Breitzke and Bialas, 2003; A.R. Talukder et al., 2007; A.R. Talukder et al., 2008). Es hat sich allerdings gezeigt, dass die eingesetzten Materialien (Steckverbinder, Gehäuselegierungen, etc.) einem häufigen Feldeinsatz nicht gewachsen sind. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde das neue System mit verbessertem elektronischem und mechanischem Konzept entwickelt.

#### *A2-2 – Elektromagnetik*

Der Ansatz einer Methanhydraterforschung anhand elektromagnetischer Messungen wurde erstmals an der University of Toronto entwickelt (Edwards, 1997; Yuan und Edwards, 2000). Hierzu wurde ein geschlepptes System bestehend aus einem einer Dipolquelle und einem Strang von Empfängern vorgeschlagen und auch gebaut. Dieses geometrisch starre System eignet sich hervorragend zu flächendeckenden Messungen lateraler Veränderungen (Schwalenberg et al., 2009), ist jedoch wegen seiner linearen Struktur nicht ideal zur Erkundung von 3D Strukturen.

Stationäre MT Receiver in Kombination mit einer tiefgeschleppten Dipolquelle bilden das in der Ölindustrie verwendeten experimentellen Setup zur Erkundung des tieferen Untergrunds in Hinsicht auf Öl und Gasvorkommen und kann auch zur 3D Erkundung eingesetzt werden. Dieses System wurde zwar mittlerweile auch zur Methanhydraterkundung eingesetzt (Weitemeyer, 2006), hat jedoch wegen der durch den Schleppvorgang an der Quelle verursachten ungenauen Positionierung relativ zu den stationären Empfängern und der benutzten niedrigen Frequenzen nicht genügend Auflösung, um die oberflächennahen Gashydratlagen zu charakterisieren.

Während die komplementäre Datenerfassung sowie die gemeinsame Interpretation sich in vielen „Geo“-Bereichen mittlerweile durchgesetzt hat, ist die „Joint Inversion“, also die Inversion nach gemeinsamen physikalischen Größen oder strukturellen Parametern nach wie vor eine Herausforderung und gehört noch nicht zu den Standardmethoden der Geophysik. Joint Inversion ist mittlerweile jedoch ein sehr aktives Forschungsfeld und Algorithmen werden in verschiedenen akademischen Institutionen und Firmen erforscht und entwickelt (Colombo et al., 2007; Gallardo et al., 2007; Jegen et al., 2009; Musil et al., 2003). Joint Inversion Software kann jedoch noch nicht kommerziell erworben werden und muss deshalb selber entwickelt werden. Das gleiche gilt für 3D Modellierungssoftware für marine CSEM Daten.

#### *A4 – Modellierung*

Submarine Gashydrate entstehen innerhalb der Gashydrat-Stabilitätszone (GHSZ), sobald die Konzentration an flüchtigen, gelösten Kohlenwasserstoffen (hauptsächlich Methan) die Sättigungsgrenze des Porenwassers übersteigt. Neben Temperatur und Druck haben die Gaszusammensetzung, die Salinität sowie die physikalischen Eigenschaften der Sedimente erheblichen Einfluß auf die Stabilitätsbedingungen von Gashydraten (z.B. Clennell et al., 1999; Sloan, 1990). Der größte Anteil submariner Gashydratvorkommen ist vermutlich auf die biogene Umwandlung von organisch gebundenem Kohlenstoff in Methan zurück-zuführen. Nach der derzeitigen Vorstellung führt dieser Prozess zur Ausbildung großer Mengen feinverteilter Gashydrats. In den vergangenen Jahren hat eine Vielzahl von Untersuchungen stattgefunden, mit dem Ziel, verbesserte Prognosen hinsichtlich der global in Gashydraten gebundenen Menge an Methan zu erstellen (z.B. Kvenvolden und Claypool, 1988; Milkov, 2004; Archer et al. 2009). Eine Übersicht dazu ist Abb. 2 zu entnehmen. Momentan ist davon auszugehen, dass die Gesamtmenge zwischen einigen hundert und mehreren tausend Gigatonnen Kohlenstoff beträgt. Trotz intensiver Bemühungen, scheint es derzeit nicht möglich zu sein, diesen Wert weiter einzugrenzen. Dies liegt insbesondere daran, dass Informationen über wichtige Steuerparameter, wie z.B. die Akkumulation organischer Substanz, global nur in einer begrenzten Genauigkeit verfügbar sind. Zu potentiell abbaubaren Gashydrat-Anreicherungen im Untergrund kann es ohnehin nur dann kommen, wenn ein vertikaler Aufstieg von Porenwässern (Fluiden) oder freiem Gas stattfindet und somit für eine erhöhte Zufuhr an Methan sorgt (z.B. Torres et al., 2004; Haeckel et al., 2004; Wallmann et al., 2006). Basierend auf einer kürzlich veröffentlichten Studie zur Prognostizierung der globalen Menge in situ gebildeter, biogener Gashydrate konnte gezeigt werden, dass dieses Bildungspotential ohne die Berücksichtigung vertikaler Fluid-Aufstiegsraten äußerst gering ist (Marquardt et al., 2010; Pinero et al., eingereicht; Abb. 2). Insgesamt ist jedoch zu berücksichtigen, dass Aufstiegs-geschwindigkeiten von Fluiden oder die Migration von freiem Gas 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 häufig möglich, entsprechend bessere Näherungswerte zu ermitteln, allerdings spielen auch hier eine Anzahl z. T. wenig bekannter Faktoren eine Rolle. Hierzu zählt beispielsweise die Entstehung von Wegsamkeiten durch erhöhte Porendrücke bei Akkumulation von freiem Gas (Boudreau et al., 2005) oder Gashydrat (Daigle and Dugan, 2010). Um diesem für Gashydratsysteme bedeutsamen Prozess Rechnung zu tragen, bietet die Simulation mit Hilfe von Petromod hinsichtlich der Entstehung von Migrationswegen zweierlei Möglichkeiten. Zum einen können, bekannte, große Störungssysteme zusammen mit ihren physikalischen Eigenschaften (Permeabilität, etc.) und ihrer zeitlichen und räumlichen Ausdehnung vorgegeben werden, zum anderen werden

Wegsamkeiten während der Simulation (entsprechend des „Hydrofracturing“-Konzepts) an den Stellen geschaffen, wo der Kapillardruck einen bestimmten Wert (in der Regel 80% der Differenz von lithostatischem zu hydrostatischem Druck) übersteigt. Generell bleibt festzuhalten, dass nennenswerte Akkumulationen von Gashydrat an sogenannte „Hotspots“ gebunden sind, an denen aufgrund der lokalen geologischen und tektonischen Gegebenheiten der Aufstieg methanreicher Fluide begünstigt ist (Milkov, 2005; Torres et al., 2004). Größere Anreicherungen submariner Gashydratvorkommen sind daher nach derzeitigem Kenntnisstand nur durch den Aufstieg freien Gases zu erklären (Wallmann et al., 2006).

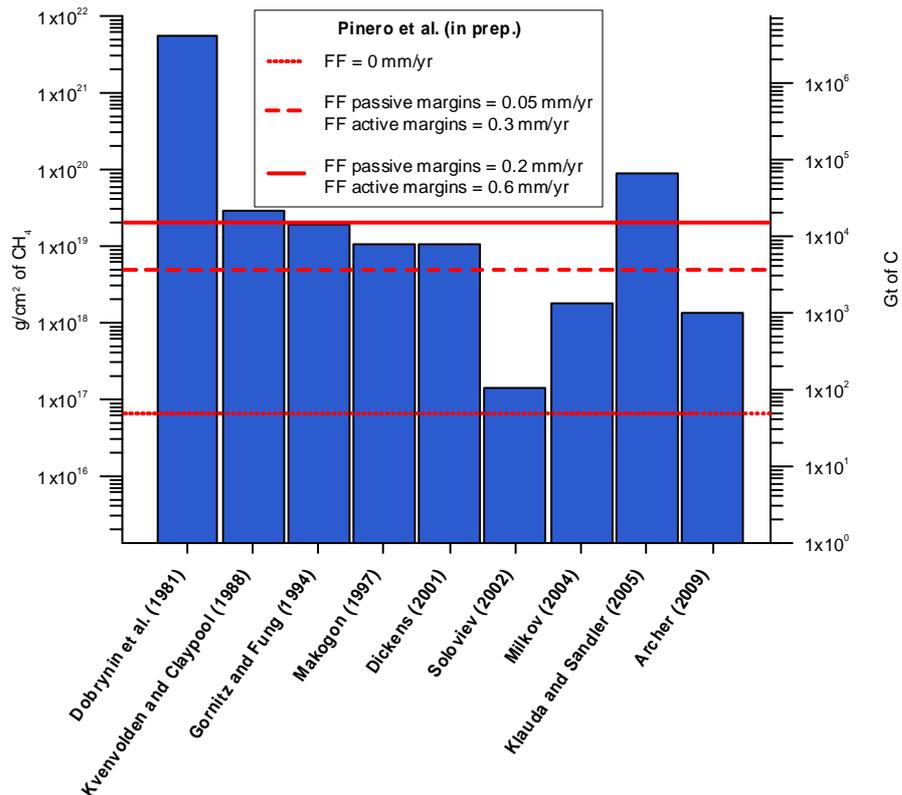


Abb. 2: Globale Schätzungen der in marinen Gashydraten gespeicherten Kohlenstoffmenge. Rote Linien entsprechen neuen Ergebnissen von Piñero et al. (eingereicht). Die unterschiedlichen Mengen ergeben sich aus verschiedenen Annahmen für die vertikale Fluid-Aufstiegsgeschwindigkeit (FF).

### Z – Testfahrt

Aufgabe der Fahrt P-405 war die See-Erprobung neuer geoakustischer Vermessungs-systeme aus dem Projekt SUGAR. Der Schwerpunkt der Reise lag deutlich auf der technischen Weiterentwicklung und Integration der Systeme in den Routineeinsatz. Das Fächerecholot SBE3050 von ELAC Nautik war bereits soweit entwickelt, dass durch Kooperation anderer Stellen und Projekte eine Festinstallation an Bord der POSEIDON vor der Expedition erfolgen konnte. Die Einzelkomponenten des tiefgeschleppten Streamers wurden vor der Ausfahrt im

Labor getestet. Eine kurze Kette aus Referenzknoten konnte auch schon auf der Kieler Förde für einen Schleppversuch betrieben werden. Die komplette Montage der Messkette und die Verbindung über ein Tiefseekabel fand erstmalig an Bord statt. Die Komponenten des geschleppten CSEM Systems wurden bereits so früh im SUGAR Projekt fertiggestellt, das eine erste See-Erprobung bereits auf anderen Schiffen erfolgen konnte. Hier stand der erste Einsatz der kompletten Empfangslänge und Arbeiten zur Signal-Rausch Verbesserung im Fokus. Diese Kalibrierungsarbeiten sind an Land nur schwer umzusetzen.

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

### *A1-1 – Hydroakustik*

Alle Arbeitspakete des Vorhabens SUGAR A1 wurden in enger Zusammenarbeit zwischen IFM-GEOMAR und L-3 ELAC Nautik umgesetzt. Während die technische Umsetzung des Vorhabens auf Seiten des Projektpartners L-3 ELAC Nautik lag, war die methodische Entwicklung geeigneter Algorithmen zur Gasblasen-Detektierung Schwerpunkt der Arbeiten am IFM-GEOMAR.

### *A2-1 – Geophysik*

Während internationaler wissenschaftlicher Tagungen (AGU, EGU) wurden Erfahrungen mit den Anwendern von DTAGS und PASISAR ausgetauscht. Ebenso wurden über Konferenzbeiträge Informationsgespräche mit anderen Betreibern geschleppter Systeme initiiert. Während Arbeitstreffen zwischen den Arbeitsgruppen PASISAR (IFREMER) und DTMCS (IFM-GEOMAR) wurden technische Erfahrungen und Einzelheiten ausgetauscht. Insbesondere eine Anbindung des DTMCS-Mehrkanalstreamers (IFM-GEOMAR) an die Signalquelle des PASISAR (IFREMER) wurde analysiert. Die technische Steuerung der PASISAR Quelle ließ sich jedoch nicht mit dem Multisensorkonzept (Streamer, Sidescan und Sub-Bottom Profiler) des DTMCS verbinden.

### *A2-2 – Elektromagnetik*

Eine enge Zusammenarbeit wurde mit der Firma Magson, welche an der elektronischen Weiterentwicklung der Empfänger gearbeitet hat, geleistet. Desweiteren bestand eine enge Kollaboration mit der University of Toronto. Dr. Andrei Swidinsky, der 2010 an der University of Toronto promovierte, ist mittlerweile als PostDoc im SUGAR-Projekt am IFM-GEOMAR angestellt, wo er Joint Inversion Strategien entwickelt. Weiterhin erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit Wintershall und RWE-DEA, welche Projekte zur Entwicklung mariner Instrumente und der Erkundung von Schlammvulkanen finanzierte und in deren Rahmen die in SUGAR entwickelten Technologien getestet werden konnten.

#### *A4 – Modellierung*

Neben der intensiven Zusammenarbeit mit unserem SUGAR-Partner Schlumberger AaTC zur Entwicklung und Erstellung des Gashydratmoduls in PetroMod, erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit verschiedenen Wissenschaftlern und Institutionen im In- und Ausland, vor allem mit Tim Collett und Tom Lorenson vom U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, United States, zur 3-D Modellierung der Gashydratlagerstätten des Alaska North Slope, mit Marta E. Torres vom College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Corvallis, Oregon, United States, zu den Gashydrat-Vorkommen am Hydrate Ridge sowie zu den Gashydratlagerstätten des Alaska North Slope, mit Anne Tréhu vom College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Corvallis, Oregon, United States, zu den geologischen Gegebenheiten und Gashydrat-Vorkommen am Hydrate Ridge.

#### *Z – Testfahrt*

Für die Durchführung der CSEM-Experimente musste ein Tiefseekabel mit großem Querschnitt für die Durchleitung sehr hoher Ströme bereitgestellt werden. Diese Winde wurde durch das NOC in Southampton im Rahmen des OFEG Barter-Abkommens zur Verfügung gestellt.

#### Literatur:

- Archer, D., B. Buffett, and V. Brovkin (2009) Ocean methane hydrates as a slow tipping point in the global carbon cycle, *Proc. Natl. Acad. Sci. (PNAS)*, 106, 20596-20601.
- Arnason, K. (1999) Consistent discretization of electromagnetic fields and transient modeling. In: Oristaglio M, Spies, B & Cooper, M (ed.) *Three-Dimensional Electromagnetics*, SEG, 103-118.
- Bialas, J. (2011a), POS-405 RV POSEIDON Cruise ReportRep., IFM-GEOMAR, Kiel.
- Bialas, J. (2011b), FS SONNE Fahrtbericht / Cruise Report SO-214 NEMESYSRep., 174 pp, IFM-GEOMAR, Kiel.
- Bialas, J., S. Mykhaylyuk, A. Vasiliev, I. Klauke, C. Papenberg, and K. Schwalenberg (2011), The experimental-methodical geophysical studies in the RV POSEIDON cruise 405, *Geophysical Journal*, IGPH, Kiev, 3(33), 10.
- Boswell R, Rose K, Collett TS, Lee M, Winters W, Lewis KA, Agena W. (2011) Geologic controls on gas hydrate occurrence in the Mount Elbert prospect: Milne Point Unit, Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 28(2), 589-607.
- 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.
- Breitzke, M., and J. Bialas (2003), A deep-towed multichannel seismic streamer for very high-resolution surveys in full ocean depth, in *First Break*, edited, p. 7.
- Clennell M. B., Hovland M., Booth J. S., Henry P., and Winters W. J. (1999) Formation of natural gas hydrates in marine sediments: 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties. *J. Geophys. Res.* 104(B10), 22,985-23,003.
- Collett TS, Lee MW, Agena WF, Miller JF, Lewis KA, Zyrianova MV, Boswell R, Inks TL. (2011) Permafrost associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope. *Marine Petroleum Geology*, 28(2), 279-294.
- Colombo D. and M. D. Stefano (2007) Geophysical modeling via simultaneous joint inversion of seismic, gravity, and electromagnetic data: Application to prestack depth imaging: *The Leading Edge*, 26, 326–331.
- Daigle, H. and 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, doi:10.1016/S0146-6380(01)00086-9.

- Dobrynin, V.M., Korotajev, Y.P. and Plyushev, D.V. (1981) Gas hydrates-one of the possible energy sources, in: Long-Term Energy Resources, edited by R.G. Meyer, and J.C. Olson, Pitman, Boston, MA: 727-729.
- Edwards, R.N (1997) On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using a seafloor transient electric dipole-dipole method", *Geophysics*, 62, 63-74.
- Gallardo, L. A. (2007) Multiple cross-gradient joint inversion for geospectral imaging: *Geophysical Research Letters*, 34, L19301.
- Gettrust, J. F. and J. H. Ross (1990), Development Of A Low-frequency, Deep-towed Geoacoustics System, paper presented at OCEANS '90. 'Engineering in the Ocean Environment'. Conference Proceedings, 24-26 Sep 1990.
- Gettrust, J. F., W. T. Wood, and S. E. Spychalski (2004), High-resolution MCS in deepwater, *The Leading Edge*, 23(4), 374-377.
- Gornitz, V. and I. Fung (1994) Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans, *Global Biogeochemical Cycles* 8, 335–347.
- Greinert J., Artemov Y., Egorov V., M. De Batist, McGinnis D. (2006) 1300-m-high rising bubbles from mud volcanoes at 2080m in the Black Sea: Hydroacoustic characteristics and temporal variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 244, 1–15.
- Haeckel M., Suess E., Wallmann K., and Rickert D. (2004) Rising methane gas bubbles form massive hydrate layers at the seafloor. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68(21), 4335-4345.
- Jegen, M., S. Hoelz, A. Swidinsky, W. Brueckmann (2011) Quantification of marine sulfide deposits using marine electromagnetic methods, Extended Abstract, Ocean 11 Conference, Hawaii, Sept. 19-22.
- Jegen, M. D., and R. W. Hobbs, P. Tarits, and A. Chave (2009) Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints: Preliminary results of subbasalt imaging off the Faroe Shelf: *Earth and Planetary Science Letters*, 282, no.1-4, 47-55.
- Klauda, J. B. and Sandler, S. I. (2005) Global Distribution of Methane Hydrate in Ocean Sediment, *Energy Fuel* 19: 459 – 470, 10.1021/ef049798o.
- Kvenvolden, K.A. and Claypool, G.E. (1988) Gas hydrates in oceanic sediment. U.S. Geological Survey Open-File Report: 88-216.
- Lorenson, T.D., Collett, T.S. and 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
- Makogon, Y.F. (1997) *Hydrates of Hydrocarbons*. Penn Well Publishing Company, Tulsa, 504pp.
- Marquardt, M., Hensen, C., Pinero, E., Wallmann, K., and Haeckel, M. (2010) A transfer function for the prediction of gas hydrate inventories in marine sediments. *Biogeosciences* 7, 2925-2941.
- Middelburg, JJ (1989) A simple rate model for organic matter decomposition in marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 1577 - 1581.
- 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, doi:10.1016/j.earscirev.2003.11.002.
- Milkov A. V. (2005) Molecular and stable isotope compositions of natural gas hydrates: A revised global dataset and basic interpretations in the context of geological settings. *Organic Geochemistry* 36(5), 681-702.
- Musil, M., H. R. Maurer, and A. G. Green (2003) Discrete tomography and joint inversion for loosely connected or unconnected physical properties: application to crosshole seismic and georadar data sets: *Geophysical Journal International*, 153, 389–402.
- Pfannkuche, O. (2005) Cruise Report ALKOR 259: Methane cycle at shallow gaseous sediments in the central North Sea.
- Piñero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K. (eingereicht) Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. *Biogeosciences*.
- Piñero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M, And Wallmann, K. (2010a). Global distribution of gas hydrates in marine sediments: application of a general transfer function. European Geosciences Union (EGU)-10, Vienna (Austria), 2-7th May.
- Piñero, E., Hensen, C., Marquardt, M., Haeckel, M. And Wallmann, K. (2010b) Role of in situ organic matter degradation and fluid flow in the global gas hydrate distribution: application of general functions. AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 13-17th December.
- Popescu, I., M. De Batist, G. Lericolais, H. Nouzé, J. Poort, N. Panin, W. Versteeg, and H. Gillet (2006) Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions, *Marine Geology*, 227(3-4), 163-176.
- Rehder, G. et al. (2002) Enhanced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean. *Geophys. Res. Lett.* 29, 10.1029/2001GL013966.
- Savoie, B., P. Leon, Y. H. d. Roeck, B. Marsset, L. Lopes, and J. Herveou (1995) PASISAR: a new tool for near-bottom very high-resolution profiling in deep water, *First Break*, 13(6).

- Schleisiek, K., J. Bialas, I. Klauke, and C. Papenberg (2011) Deep Towed Streamer for Seismic Exploration of Shallow Gas-Hydrate Layers, paper presented at EGU General Assembly 2011, EGU, Vienna.
- Schneider von Deimling, J., Brockhoff, J., Greinert, J. (2007) Flare imaging with multibeam systems: Data processing for bubble detection at seeps, G3, Technical Brief, Volume 8, Number 6.
- Schwabenberg 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, *Marine Geology*, 272, 79-88.
- Sloan E. D. J. (1990) Clathrate hydrates of natural gases; Chapter: Hydrates in the Earth (ed. I. M. Dekker). NY and Basel.
- Soloviev, V.A. (2002) Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations, *Russ. Geol. Geophys.*, 43, 609 - 624.
- Talukder, A. R., J. Bialas, D. Klaeschen, W. Brueckmann, T. Reston, and J. Petersen (2008) Tectonic framework of the mud mounds, associated BSRs and submarine landslides, offshore Nicaragua Pacific margin, *J Geol Soc London*, 165(1), 167-176.
- Talukder, A. R., J. Bialas, D. Klaeschen, D. Buerk, W. Brueckmann, T. Reston, and M. Breitzke (2007) High-resolution, deep tow, multichannel seismic and sidescan sonar survey of the submarine mounds and associated BSR off Nicaragua pacific margin, *Marine Geology*, 241(1-4), 33-43.
- Tokarev, M., N. Kuzub, R. Pevzner, D. Kalmykov, and S. Bouriak (2008) High resolution 2D deep-towed seismic system for shallow water investigation, *First Break*, 26(4).
- Torres M. E., Wallmann K., Tréhu A. M., Bohrmann G., Borowski W. S., and 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., Obzhairov A., Pavlova G., and 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.
- Weitemeyer K., Constable, S., Key, K., and Behrens, J. (2006) First results from a marine controlled-source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon. *GRL*, 33, L03304, doi:10.1029/2005GL024896.
- Yuan, J. and Edwards, R.N. (2000) The assessment of marine hydrates through electrical remote sounding: Hydrate without a BSR? *Geophysical Research Letters*, 27, 16, 2397-2400.

## II. Eingehende Darstellung

### **1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

#### *A1-1 – Hydroakustik*

Die Zuwendung im Teilprojekt A1-1 wurde im Wesentlichen für die Einstellung eines PostDocs sowie für Investitionen bewilligt. Als PostDoc wurde Dr. Cord Papenberg eingestellt. Dr. Papenberg verfügt aus seinen Arbeiten im Gebiet der Seismischen Ozeanografie und der Gashydrat-Forschung und aus dem Umgang mit Fächerecholotdaten über umfangreiche Kenntnisse des Messsystems als auch über mehrjährige Erfahrung in der Entwicklung neuer algorithmischer Methoden. Die Investitionen in Komponenten des Fächerecholotes (Sende-, Empfangsschwinger mit Halterung, Bewegungssensor) waren notwendig, um die Systemtests während der Ausfahrten mit FS POSEIDON im Schwarzen Meer und mit FS SONNE vor Neuseeland durchführen zu können.

In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse im Einzelnen aufgeführt, die im Teilprojekt A1-1 erzielt wurden. Die Ergebnisse sind den jeweiligen Zielen gegenüber gestellt. Die Entwicklung des übergeordneten Projektzieles, der Objektdetektierung, kann in mehrere Phasen unterteilt werden: Konzeptentwicklung, Schaffung technischer Voraussetzungen, Umsetzung der Konzepte, Testphase, Optimierung und Visionen.

#### *(a) Konzeptentwicklung*

Um Gasfahnen in Fächerlotdaten identifizieren zu können, muss man sie von Störsignalen trennen können. Die Herausforderung hierbei sind die stark unterschiedlichen Amplituden der jeweiligen Signale. Die starke Reflexion des Meeresbodens und die damit auftretenden Seitenechos im gesamten Fächer, Fische oder andere Biomasse innerhalb der Wassersäule und nicht zuletzt Wettereinflüsse, sie alle überlagern unterschiedlich stark jenes Signal, welches von aufsteigenden Gasblasen erzeugt wird. Um diese Signale erfolgreich trennen zu können, wurde das Konzept der räumlichen bzw. zeitlichen Kontinuität entwickelt. Hierbei nutzt man die jeweiligen typischen Eigenschaften der Objekte aus, wie sie sich als zeitliche bzw. räumliche Abfolge definieren. Fische z. B. schwimmen meist horizontal und selten vertikal. Wetterabhängige Störsignale tauchen willkürlich auf (musterlos). Gasfahnen haben eine Kontinuität im Raum, meist vertikal, und steigen vom Meeresboden auf. Durch diese spezifischen Eigenschaften lassen sich die Signale zumindest theoretisch voneinander trennen. Die räumliche Kontinuität lässt sich durch zeitlich aufeinanderfolgende Fächerregistrierungen (Pings) auf einer bewegten Plattform (Forschungsschiff) realisieren (Abb. 3).

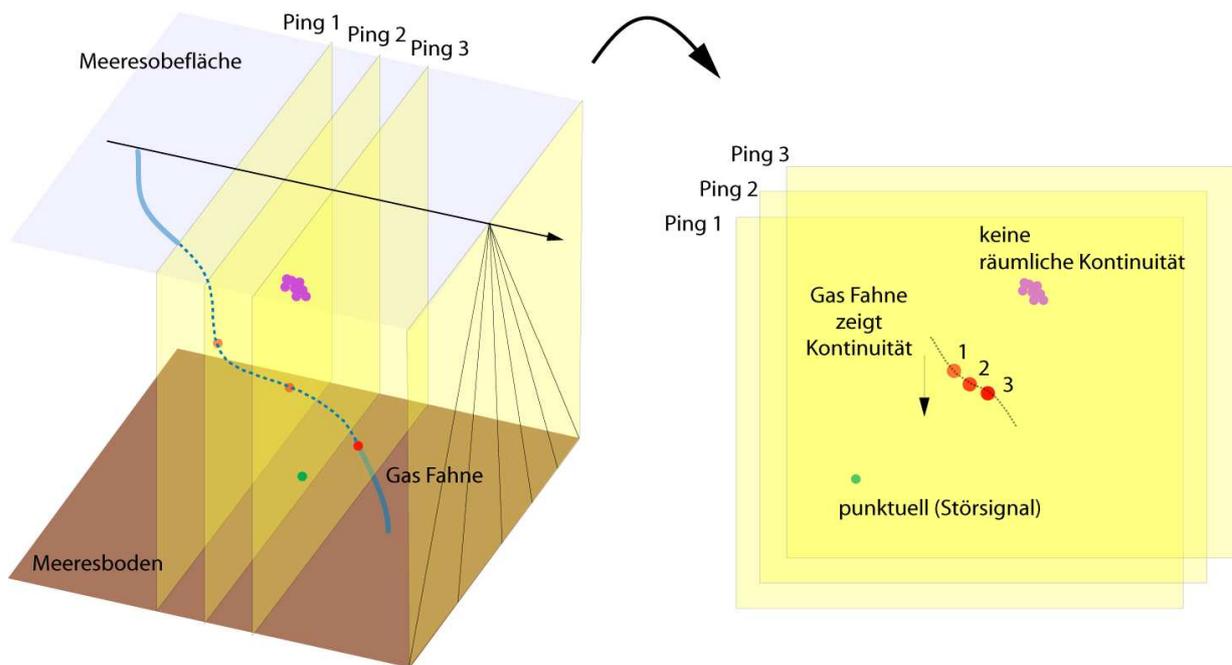


Abb. 3: Schema zum Konzept der Objektdetektierung durch räumliche Kontinuität.

*(b) Schaffung technischer Voraussetzungen*

Parallel zu den konzeptionellen Ansätzen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner L-3 Elac Nautik die technischen Voraussetzungen geschaffen. Hierfür wurden geeignete Datenformate für die hochauflösenden Messdaten der Wassersäule (WCI Daten) einerseits, als auch für die erforderlichen Steuerparameter andererseits, gemeinsam spezifiziert. Das von L-3 ELAC Nautik entwickelte Visualisierungsprogramm, der WCI Viewer, spielt hierbei eine zentrale Rolle. Der Viewer dient als Arbeitsmodul, um mit WCI Daten visuell zu arbeiten und um die Algorithmen zu testen. Weiterhin wurde die Objektmarkierung und automatische Objekterkennung in den Viewer integriert. Durch die Trennung der technischen und methodischen Entwicklung der jeweiligen Teilprojekte war eine kontinuierliche Zusammenarbeit und ständige Absprachen der Schnittstellen (Abb. 4) unerlässlich und während der Projektdauer regelmäßig durchgeführt worden.

Weiterhin wurde eine Formatumwandlung konzipiert, um die WCI Daten mit bereits vorhandenen Softwarepaketen bearbeiten sowie die darin integrierten numerischen Bibliotheken nutzen zu können. Zur Darstellung der WCI Daten und der Ergebnisse der Objektdetektion wurde zusätzlich zum WCI Viewer das in der Fächerlotgemeinschaft weltweit verwendete Visualisierungsprogramm Fledermaus (IVS3D (TM) <http://www.ivs3d.com>) genutzt. Die hierfür notwendige Formatumwandlung wurde erfolgreich entwickelt.

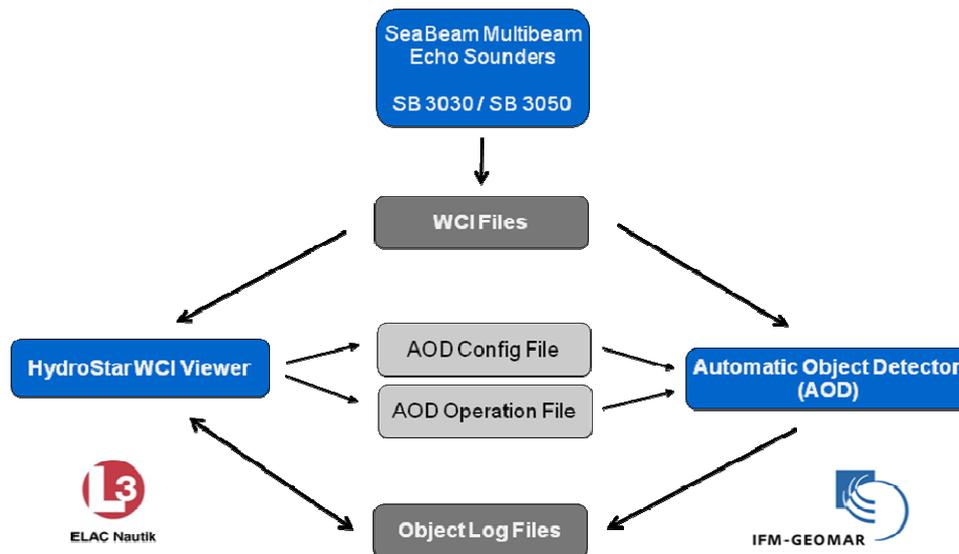


Abb. 4: Schematische Darstellung der Konfigurations- und Datei-Schnittstellen.

*(c) Umsetzung der Konzepte*

Das Umsetzen des Konzeptes der räumlichen Kontinuität erfolgte in 4 Phasen:

- Einlesen und Selektieren der WCI Daten (Datenumwandlung),
- Bearbeiten (Signalverbesserung) im Fächer und Detektion,
- Bearbeitung (Signalverbesserung) im Raum und Detektion.
- Ausgabe der bearbeiteten (signalverbesserten) Daten und Objektmarkierung.

Ein Modul zum Einlesen und Dateiumwandlung der WCI Daten wurde erfolgreich entwickelt. Hierbei kann optional und manuell eine Selektion der Daten vorgenommen werden, um die enormen Datenmengen vorab zu reduzieren. Eine automatische Selektion ist bereits integriert, jedoch erst mit weiteren Datensätzen sinnvoll einsetzbar. Um weitere Bearbeitungsschritte zeiteffizient zu ermöglichen, ist in dieser Phase eine Datenreduktion in Form des Downsamplings in Raum und Zeit eingebunden. Die WCI Daten können somit noch sinnvoll um einen Faktor von 10 reduziert werden, verlieren jedoch an Auflösung. Die Datenreduktion spielt eine wichtige Rolle, um zukünftig in Echtzeit die Daten bearbeiten zu können und um eine performante Visualisierung zu gewährleisten. Die Bearbeitung im Fächer konzentrierte sich hauptsächlich auf die Beseitigung des vom Meeresboden ausgelösten Seitenechos, welches sich über den gesamten Fächer zieht (Abb. 5). Nach der Bearbeitung ist das Objekt im Fächer isoliert und einfacher zu detektieren.

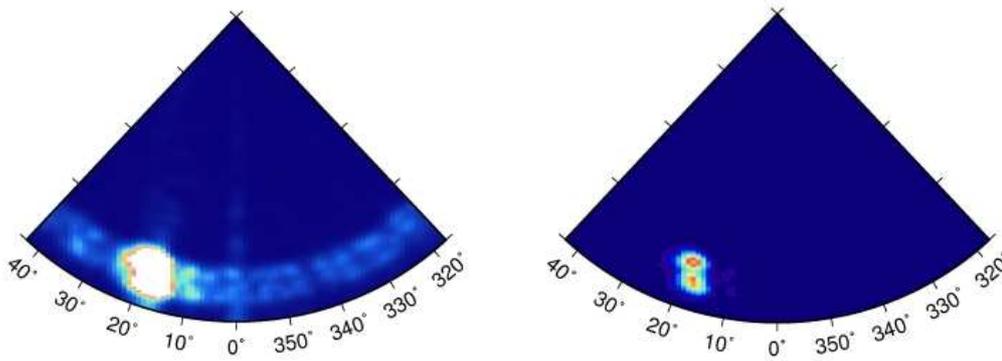


Abb. 5: Fächerdarstellung eines WCI Datensatzes: Rohdaten mit Seitenecho (links) und bearbeitete Daten mit isoliertem Objekt (rechts).

Eine andere Darstellung der Daten ist der sogenannte „aufgeklappte Fächer“ (Abb. 6). Durch diese Datenkonversion lassen sich isoradiale Störsignale, wie z.B. das Seitenecho des Meeresbodens besser herausfiltern. In Abb. 6 sind die verschiedenen Phasen der Objektdetektierung vereinfacht dargestellt. Die Daten werden innerhalb eines wählbaren Zeitfensters eingelesen und zusätzlich reduziert (downsampling). Eine der Seismik ähnliche Methode des Stapelns (Stacking) hat sich hierbei bewährt. Im zweiten Panel der Abb. 6 sieht man das Ergebnis dieses Prozesses. Im 3. Panel wurden die Daten „konditioniert“, d. h. mit einer Ja-Nein Maske versehen und somit auf Werte von 1 und 0 reduziert. Nach dem erneuten Anwenden eines Schwellwertes erhält man die gewünschten und gespeicherten Objekte als Punkte (4. Panel).

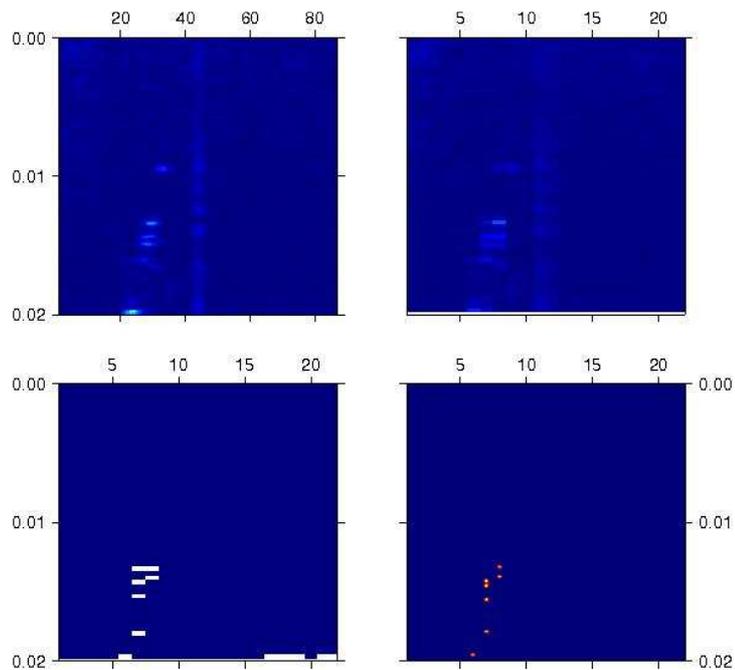


Abb. 6: „Aufgeklappte“ Darstellung der 4 Phasen der Objektdetektierung und Objektmarkierung im WCI Viewer.

Die Durchführung erfolgte nach den Spezifikationen der Steuerdateien der vom Projektpartner L-3 ELAC Nautik und IFM-GEOMAR erarbeiteten Formatschnittstellen. Die Objektdetektion durch den entwickelten Algorithmus (AOD: automatic object detection) wurde als Echtzeitprozess und als Nachbearbeitungsschritt konzipiert. Die im Fächer durch den AOD erfassten Objekte können im WCI Viewer optional visualisiert werden (Abb. 7).

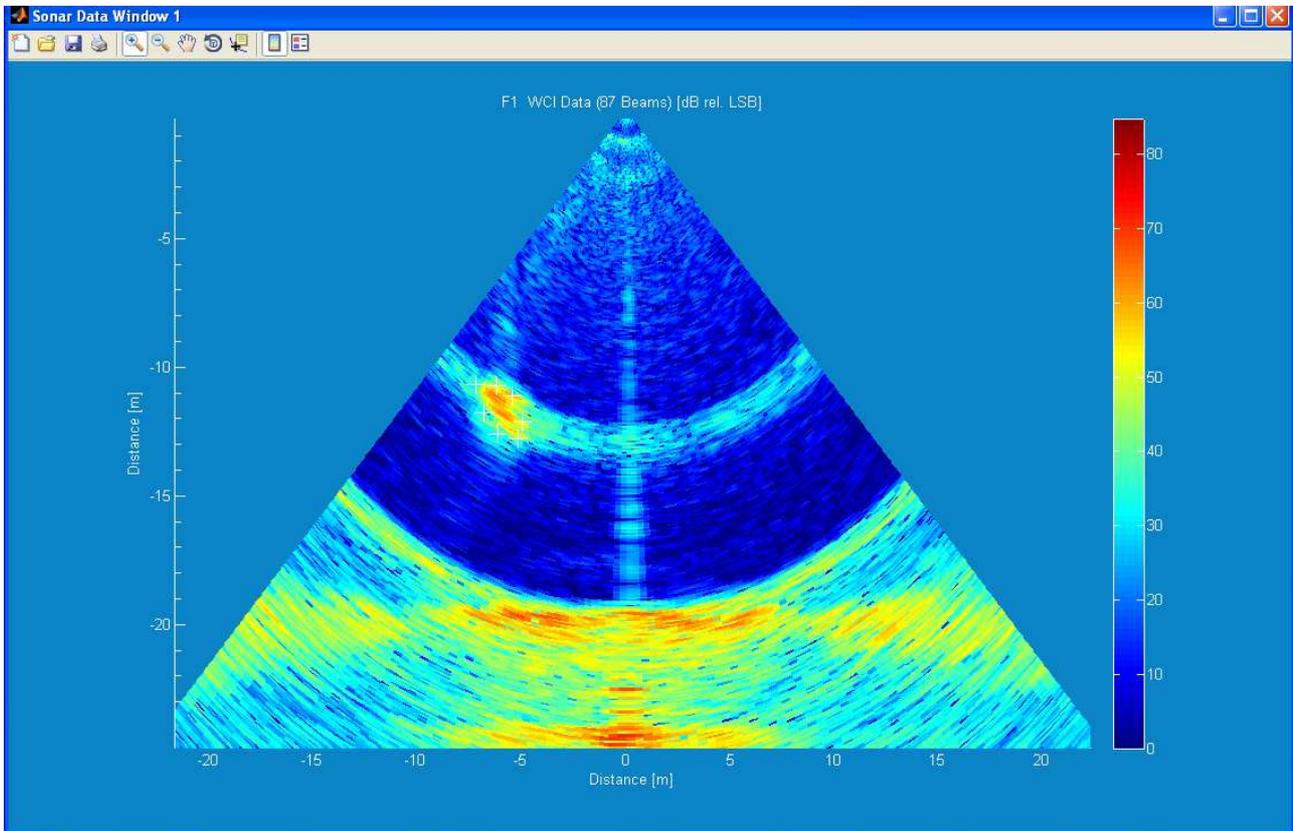


Abb. 7: Fächerdarstellung eines Testdatensatzes im WCI Viewer und automatisch (mit AOD) detektierten Objekten (weiße Kreuze).

Neben der Datenbearbeitung und Signalverbesserung im Fächer wurden auch räumliche Bearbeitungsschritte entwickelt. Diese umfassten sowohl die Signalverbesserung als auch die Objektmarkierung durch das Konzept der räumlichen Kontinuität. Für diesen Bearbeitungsschritt werden mehrere zeitlich aufeinanderfolgende Fächer gesammelt und als sog. Daten-Volumen oder Datenwürfel betrachtet und bearbeitet. Diese Datenwürfel kann man von mehreren Seiten „aufschneiden“ (Abb. 8 und 9), um den zeitlichen bzw. räumlichen Verlauf der Objekte leichter identifizieren zu können und somit auch algorithmisch leichter erfassen zu können. Abb. 8 zeigt die Singlebeam Darstellung oder Einzelbeamabspielung des Datenwürfels drei einzelner zentraler Beams (24, 29, 36). In dieser Darstellung wird deutlich, wie sich die Objekte zeitlich verhalten und man erkennt deutlich die vertikale Bewegungskomponente der sich aus dem Meeresboden lösenden Gasblasen. Die zweite Darstellungsmöglichkeit sind die Zeit- bzw.

24

Tiefenscheiben, wie sie in Abb. 9 zu sehen sind. Auch hier erkennt man die aufsteigenden Gasblasen deutlich als isolierte Punktwolke und kann sie somit einfach von anderen Objekten trennen.

Zusammengefasst lassen sich Signalverbesserungsprozesse und die Objektdetektierung einerseits im Fächer realisieren, andererseits wird insbesondere die Objektmarkierung erst im Datenvolumen (Prinzip der räumlichen Kontinuität) stabil.

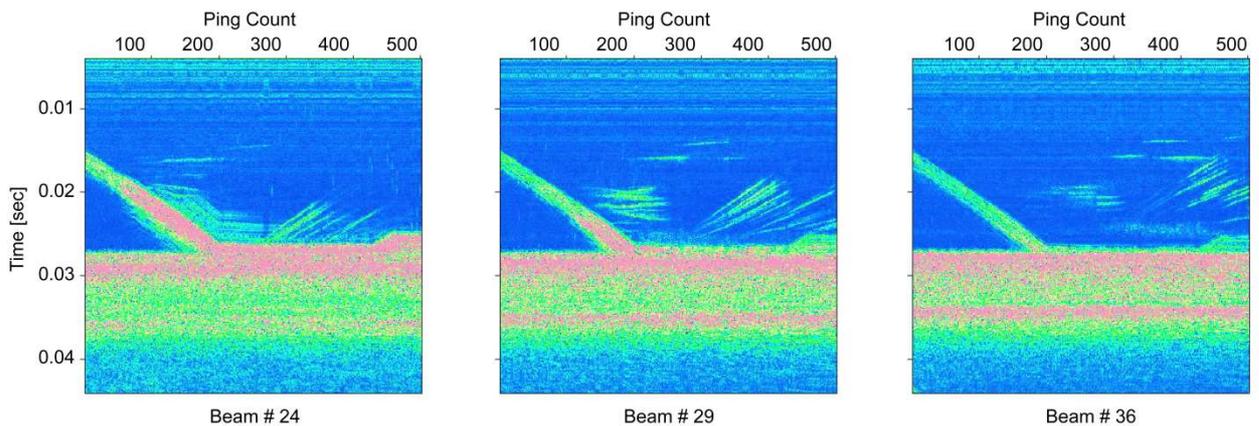


Abb. 8: Singlebeam-Darstellung bzw. Einzelbeamabspielung des Datenwürfels aufeinanderfolgender Pings.

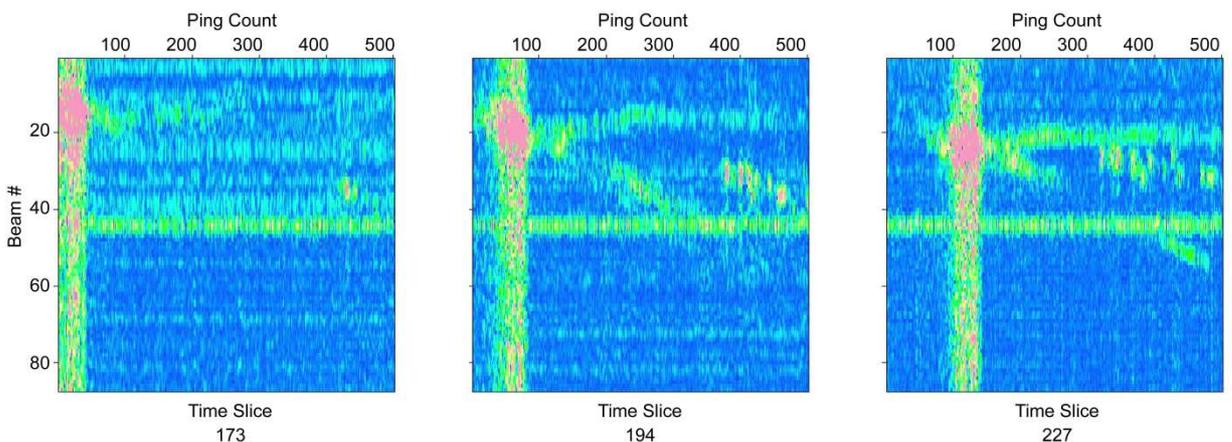


Abb. 9: Zeit- bzw. Tiefen-Scheiben des Datenwürfels.

#### (d) Testphase

Die entwickelten Methoden wurden während der Ausfahrt POS405 mit dem Forschungsschiff FS Poseidon im Schwarzen Meer getestet. Hierfür wurde erstmals das vom Projektpartner entwickelte Fächerlot SEABEAM 3050 an Bord des FS Poseidon fest installiert. Auftretende Gasfahnen waren vom Untersuchungsgebiet bereits bekannt, so dass die Detektierung solcher gewährleistet war. Die Echtzeit-Detektierung, d.h. die Erfassung und Markierung der Gasfahnen

während des Messbetriebs, wurde in der Anfangsphase abgebrochen, da die anfallenden Datenmengen nicht mehr vom System und den weiteren Bearbeitungsschritten in Echtzeit bearbeitet werden konnten. Die Algorithmen wurden zeitversetzt auf die Daten angewandt, und im sog. Postprocessing wurden im Nachhinein die Objekte markiert (Abb. 10).

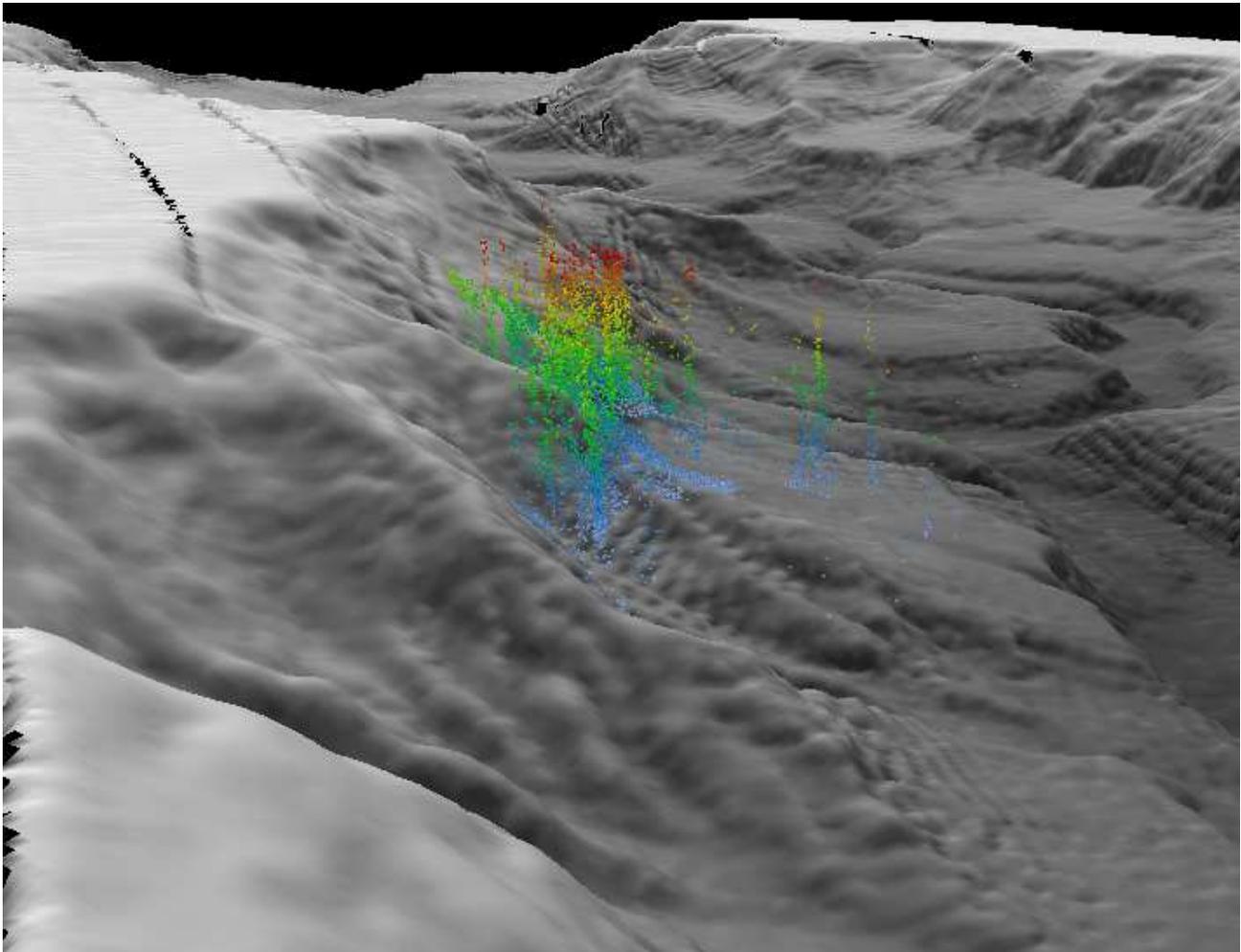


Abb. 10: Darstellung der Gasaustrittsstelle im Donaudelta (Schwarzes Meer), detektiert durch die entwickelte Objekterfassung (AOD).

#### *(e) Optimierung und Visionen*

Schon während und auch nach der Testfahrt wurden weitere Verbesserungspotentiale identifiziert. Ein wesentlicher Aspekt der Verbesserungsmöglichkeiten stellt der Echtzeit-Modus dar. Die Möglichkeit in Echtzeit (online) Objekte zu identifizieren, ist ursprünglich nicht Schwerpunkt der Arbeiten gewesen, stellte sich aber im Verlaufe des Projektes als wesentlicher Bestandteil für eine zukünftige Nutzung eines solchen Systems dar. Die Bearbeitung und Visualisierung der Daten in Echtzeit erforderte weitere Entwicklungen in den bereits

vorhandenen Algorithmen, aber auch neue Konzepte in der gesamten Bearbeitungskette. Während die im Teilprojekt A1-1 entwickelten Methoden dahingehend erweitert werden konnten, sind die identifizierten Verbesserungspotentiale, welche eine Überarbeitung der gesamten Prozesskette benötigen, in der 2. Projektphase SUGAR II anzugehen.

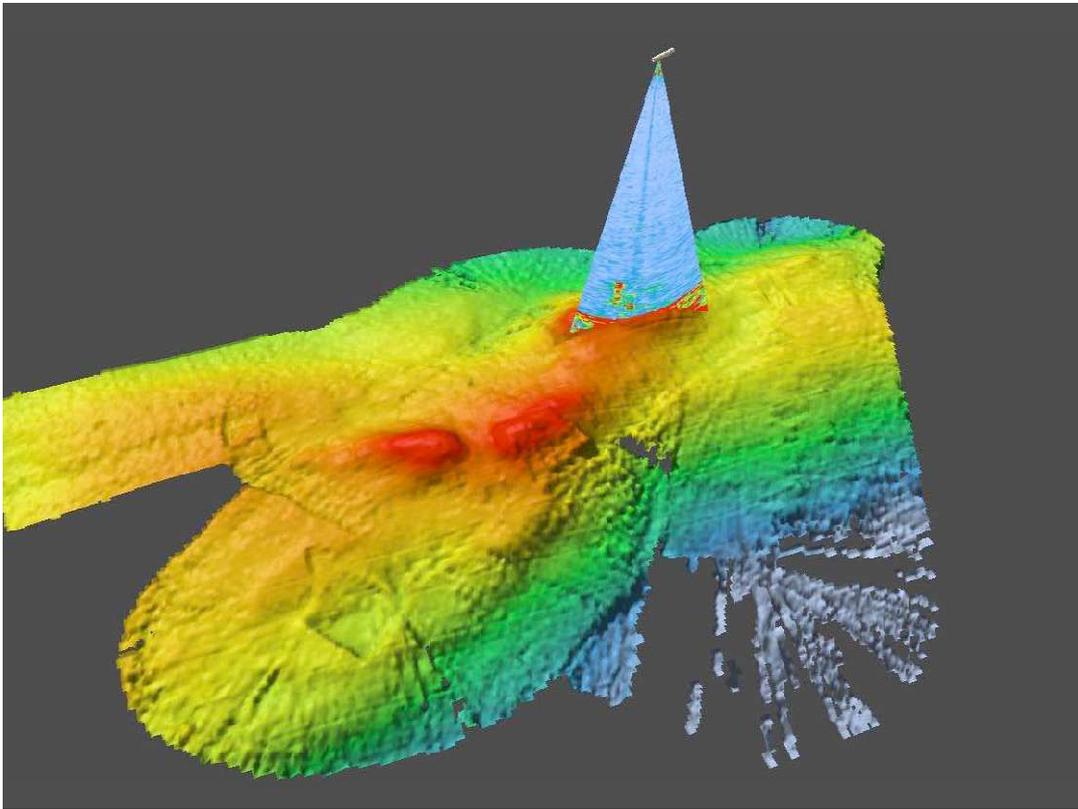


Abb. 11: Bathymetrie und Fächerdarstellung der Gasaustrittsstelle vor Neuseeland (Forschungsfahrt SO214 im Projekt Nemesys) mit dem Visualisierungsprogramm Fledermaus (TM).

#### *A2-1 – Geophysik*

Die Zuwendung im Teilprojekt A2-1 wurde im Wesentlichen für die Einstellung eines PostDoc, Vergabe von Aufträgen, Investitionen und Verbrauchsmaterial bewilligt. Die vorgegebenen Ziele gliederten sich in:

- (1) Entwicklung digitaler Hydrophonknoten,
- (2) Entwicklung auftriebsneutraler und strömungsoptimierter Druckgehäuse,
- (3) Anschaffung von 40 Streamerelementen,
- (4) Konfiguration der Streamerelemente zu einer Messkette,
- (5) Projektaufsicht und Softwareentwicklung,
- (6) Testfahrt und Auswertung.

Als PostDoc wurde, wie im Antrag namentlich benannt, Dr. Ingo Klauke eingestellt. Dr. Klauke hat die wesentlichen Phasen der Projektentwicklung begleitet. Dr. Klauke verfügt aus seinen Arbeiten mit dem tiefgeschleppten Sidescan Sonar des IFM-GEOMAR über umfangreiche Kenntnisse des Vorläufersystems. Er hat die wesentlichen Anforderungen an die Systementwicklung mit den Auftragnehmern koordiniert (5). Hierzu gehörte auch die Abstimmung über interne Datenformate und deren Überführung in seismische Standards, die für eine weitere Bearbeitung notwendig sind (5). Mit der neuen Strukturierung des internen Datenformats (Tiefe und Kompass jetzt für jedes Hydrophon, etc.) wurde eine neue Softwarelösung notwendig. Da Dr. Klauke erst nach Projektbeginn eingestellt werden konnte, ergaben sich Einsparungen in den Personalmitteln. Hierdurch konnte ein Programmierer beschäftigt werden, der die professionelle Gestaltung der Bearbeitungssoftware unterstützt hat (5). Die Bearbeitungssoftware wurde so gestaltet, dass eine Aufbereitung der Rohdaten aus dem internen Datenformat erfolgen kann. Hierdurch wird eine zeitaufwendige „realtime“ Abspielung über die Steuerungssoftware vermieden (5). Erste reale Feldtests konnten erst nach der Aufnahme echter Datensätze während der Testfahrt erfolgen (6). Restmittel der Personalausgaben wurden benutzt, um die Software von einem bisher projektfernen Mitarbeiter in der Anwendung zu testen (5).

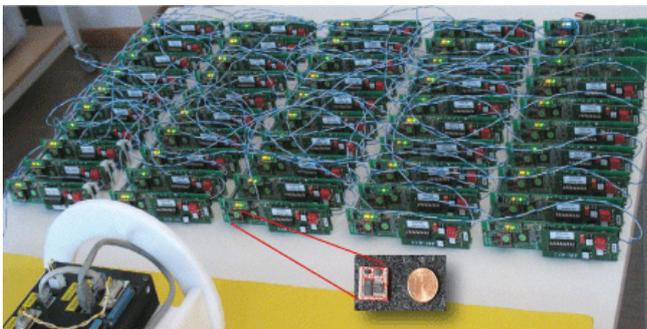


Abb. 12: Die Platinen der Hydrophonknoten sind zum Testbetrieb im Labor geschaltet. Die Vergrößerung im Vordergrund zeigt den Miniaturkompass, der in jedem Knoten enthalten ist. Unten links ist der Unterwasser-PC in der Halteschiene des Druckgehäuses zu sehen.

Für die Systementwicklung war eine Auftragsvergabe an die Firmen KUM und SEND bewilligt. Die Aufnahme der Projektarbeiten wurde durch die Insolvenz der Fa. SEND, als Projektpartner, verzögert. Mit Zustimmung des Mittelgebers konnte die Projektdurchführung aber mit der Nachfolgegesellschaft SEND Off-Shore über eine Auftragsvergabe erfolgen. Nach Projektbeginn wurden mit beiden Firmen mehrfache Planungsgespräche geführt, um die Rahmenparameter für die Gehäusedimensionierung abzustimmen (1, 2, 5; Abb. 12). Dazu wurde auch die Fa. SiS aus Schwentimental, Deutschland, eingebunden, die für Fa. SEND Off-Shore mit der Gestaltung des Tiefensensors beauftragt wurde. Der Entwicklungsfortschritt für die elektronische Systemsteuerung wurde in regelmäßigen Laborvorführungen belegt (1, 5; Abb. 13). Die Gestaltung der auftriebsneutralen Druckgehäuse wurde in mehreren Planungssitzungen mit Fa. KUM diskutiert. Insbesondere die Frage der Kraftübertragung wurde wesentlich durch die

Ausführung des ebenfalls auftriebsneutralen Datenkabels mitgeprägt (2, 5). Zur Verifizierung des Gesamtkonzeptes und der Funktionsfähigkeit der Elektronik wurde eine Demonstration auf der Kieler Förde durchgeführt (1, 2, 5).

Im Anschluss konnten die Fertigungsaufträge für ein tiefgeschlepptes Streamersystem mit 40 Hydrophonknoten gemäß der bewilligten Investitionen erteilt werden (3, 5). Auch während der Produktionsphase wurden weitere Tests der Systemkomponenten durchgeführt und Verbesserungen in die Produktion übernommen (5). Parallel wurde die Beschaffung von Verbrauchsmaterial für die Montage und Anfertigung von Steckverbindungen des Streamerkabels durchgeführt (4, 5).



Abb. 13: Hydrophonknoten vor dem Einsatz an Deck des FS SONNE Links gibt ein geöffneter Hydrophonknoten den Blick auf das Druckgehäuse frei. Die Übertragung der Zugkräfte im Streamer wird durch die Metallschienen seitlich am Druckgehäuse gewährleistet. Umschließender Auftriebsschaum (orange) kapselt die Halterung der Hydrophonknoten.

Am IFM-GEOMAR verfügbare Kabeltrommeln mit Einleiterdraht wurden benutzt, um die Ankopplung der Unterwasserkomponenten über den bordseitigen Tiefseedraht zu simulieren (1, 4, 5). Ein wirkungsvoller Feldtest konnte aber erst mit der Ausfahrt POS-405 des FS POSEIDON erfolgen (5, 6). Während der Reise sollten die im SUGAR Projekt neu entwickelten Systeme ELAC Multibeam, tiefgeschleppter Streamer und tiefgeschleppte Elektromagnetik getestet werden. Auf Grund der Platzverhältnisse an Bord musste die Arbeitszeit auf See in 2 Abschnitte geteilt werden. Nach der seismischen Erprobung wurde ein Hafenanlauf notwendig, um das Personal und gerät der Seismik gegen die Elektromagnetik zu tauschen. Während der Reise wurden weitere Anpassungen der Datenübertragung durchgeführt (5, 6). Ein weiterer Schwerpunkt lag in der Generierung und Abstimmung des Systemtriggers für den Streamer und die seismische Quelle. Auch der Einsatz realer seismischer Signale und die Abstimmung der Hydrophonverstärkung konnten hier erstmals getestet werden (5, 6). Eine abschließend geplante Profilvermessung konnte wegen schlechtem Wetter nicht mehr durchgeführt werden. Nach dem erfolgten Funktionsnachweis des Systems wurde der Streamer für die Expedition SO-

214 NEMESYS eingeplant. Hier konnte ein eindrucksvolles Profil über Methanaustritte vor Neuseeland vermessen werden (5, 6; Abb. 14).

Das Teilprojekt und seine Eingliederung in den Gesamtverbund SUGAR wurde auf mehreren internationalen Tagungen vorgestellt (6).

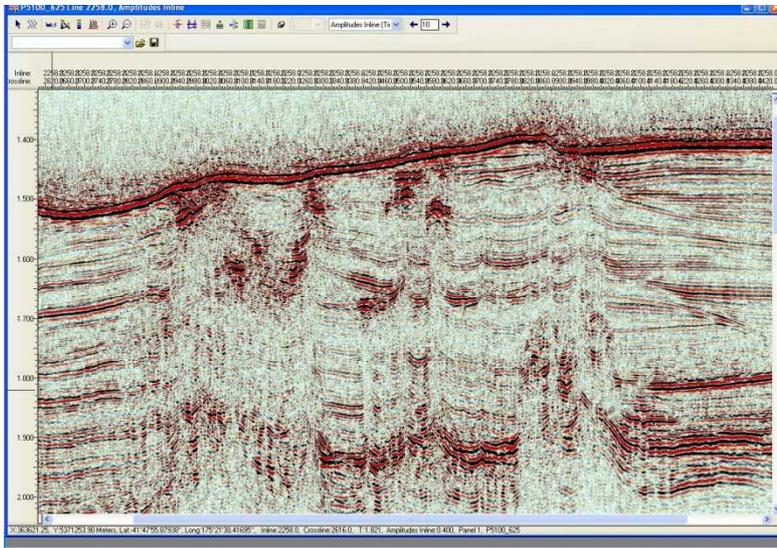


Abb. 14: Ausschnitt der Vermessung vor Neuseeland. Abgebildet ist ein einzelner Hydrohonkanal, da die Endbearbeitung aller Kanäle noch nicht erfolgt ist. Bereits bei der Darstellung dieser Rohdaten besteht die Option, den Fortgang der Sedimenthorizonte in die Förderkanäle (sonst Blanking Zonen) zu erkennen.

## A2-2 – Elektromagnetik

### (a) Bandbreitenerweiterung der marinen, elektromagnetischen Empfänger:

Bei den am IFM-GEOMAR bestehenden und zu erweiternden elektromagnetischen Empfängern handelt es sich um sogenannte magnetotellurische (MT) Geräte, mit denen natürlich vorkommende elektromagnetische Schwankungen gemessen werden, aus denen sich dann die Leitfähigkeitsverteilung der Erde in größeren Tiefen herleiten lässt. Dazu werden mittels einer elektrischen Dipolantenne horizontale elektrische Feldschwankungen sowie anhand eines Fluxgate-Magnetometers magnetische Feldschwankungen aufgezeichnet. Eine vertikale Leitfähigkeitssondierung erfolgt durch Analyse des Signals in verschiedenen Frequenzen. Da das natürliche magnetotellurische Signal auf dem Meeresboden typischerweise Frequenzen von weniger als 1 Hz aufweist, ist die Abtastrate auf 10 Hz beschränkt und Leitfähigkeitssondierungen lassen sich mit diesem Gerät mit einer Auflösung von hundert Metern bis einigen Kilometern und sogar bis in eine Tiefe von 10er Kilometer erreichen.

Die für Gashydrate erforderliche höhere Auflösung im Meterbereich lässt sich durch die Verwendung von am Meeresboden künstlich erzeugten, elektromagnetischen Wellen mit höheren Frequenzen erreichen (Controlled Source EM – CSEM). Eine ideale Wellenform des Quellsignals ist dabei das sogenannte Rechtecksignal, welches die größte Bandbreite an Frequenzen erhält. Um die gesamte Bandbreite dieses Signals aufzuzeichnen, muss die Abtastrate am Empfänger um das tausendfache auf 10 kHz erhöht werden.

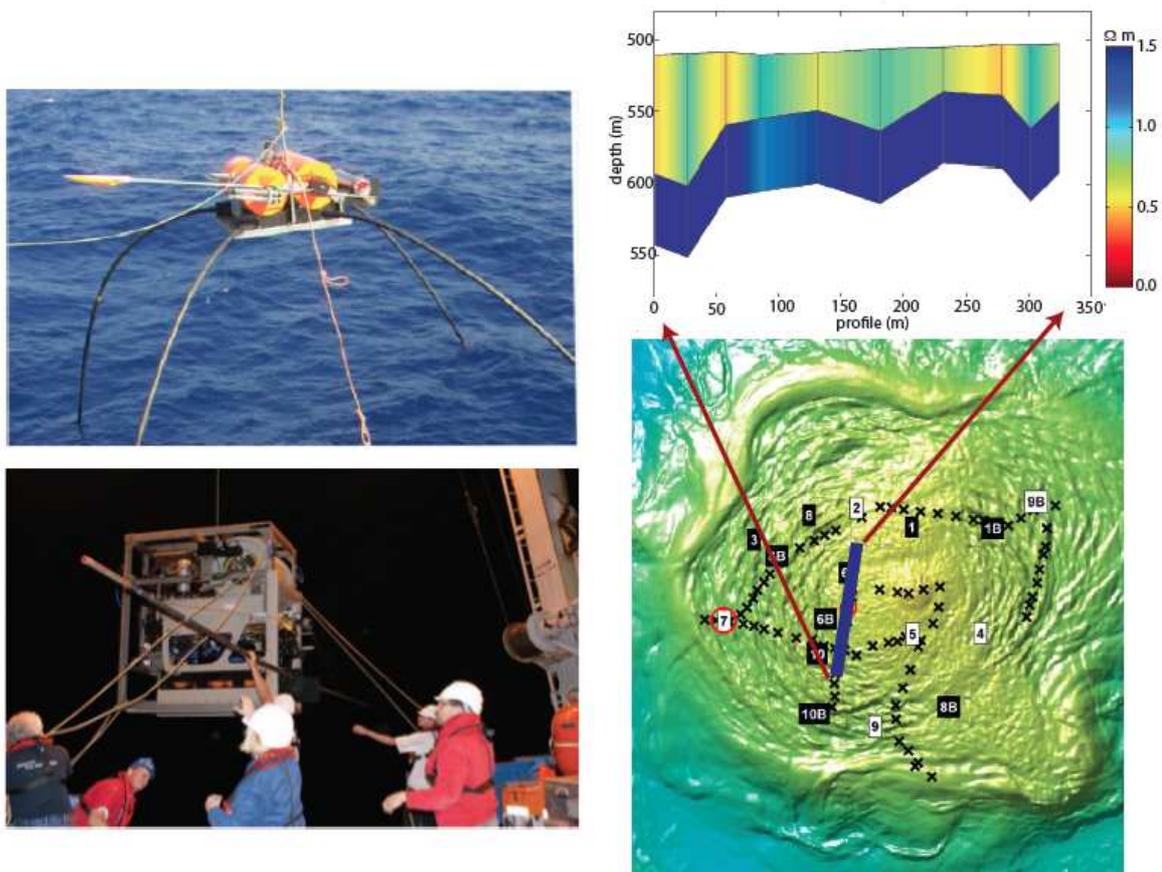


Abb. 15: Einsatz des tomographischen, elektromagnetischen Systems auf dem West Nil Delta Schlammvulkan. Im SUGAR-Projekt entwickelte elektromagnetische Breitbandempfänger (links oben), mit denen die durch eine elektromagnetische Quelle (links unten) gesendeten aktiven Signalen gemessen werden. Die Empfänger wurden stationär auf den Meeresboden platziert (weiße Quadrate) und tomographisch von verschiedenen Positionen mit der Quelle (schwarze Kreuze) angestrahlt. Die 1D Modellierungsergebnisse der aktiven Messung entlang des blauen Profils sind oben rechts dargestellt und zeigen eine hohe Auflösung.

Die Bandbreitenerhöhung wurde zusammen mit der in Berlin ansässigen Firma Magson, welche den Magnetfeldsensor sowie den Datenlogger des ursprünglichen Gerätes mitentwickelt hat, konzipiert und dann von Magson durchgeführt. Entwickelt wurde ein MT-CSEM Hybridsystem, welches im datenintensiven CSEM Modus operiert, wenn ein künstliches Quellsignal erzeugt wird, aber auch Langzeit-MT Daten aufzeichnen kann. Das Umschalten der Geräte zwischen dem niederfrequenten MT Modus und dem hochfrequenten CSEM Modus kann auf dem Meeresboden anhand eines akustischen Signals vom Schiff aus bewerkstelligt werden. Im CSEM Modus wird eine neue, separat angebrachte Leiterplatte mit Breitband ADC angesteuert, welche die elektrischen Feldschwankungen aufzeichnet und die Daten auf eine schnelle

Speicherkarte ablegt. Nach erfolgreichem Test mit einem Demonstrator in der Ostsee konnten weitere marine MT Empfänger, die in einem parallelen Projekt gebaut wurden, aufgerüstet werden, sodass jetzt eine ganze Empfängerflotte für zukünftige Messkampagnen zur Verfügung steht.

Abb. 15 zeigt das Messsystem und die Messergebnisse bei einem Testeinsatz auf einem Schlammvulkan im West Nil Delta. Die stationären Empfänger (weiße Vierecke) wurden auf der Struktur mit ca. 1000 m Durchmesser verteilt. Schwarze Kreuze markieren die Positionen eines von einem ROV bewegten elektromagnetischen Senders, der ein Rechtecksignal aussendet. Das Quellsignal konnte an mehreren Empfängern gleichzeitig aufgezeichnet werden. Die Daten zeigen generell eine gute Qualität und Präzision. Die entlang des blauen Profils für verschiedene Sender-Empfänger-Entfernungen zusammengestellten 1D Modelle zeigen die prinzipielle Präzision und Auflösungsmöglichkeit der Daten. Dabei signalisieren blaue Bereiche eine erhöhte Konzentration ausgesüßter Flüssigkeiten oder Gase. Da jedoch ein 3D Inversionsalgorithmus, der die Daten auf ein Modell zurückführt, noch fehlt, sind diese Aussagen als qualitativ und noch nicht quantitativ zu verstehen.

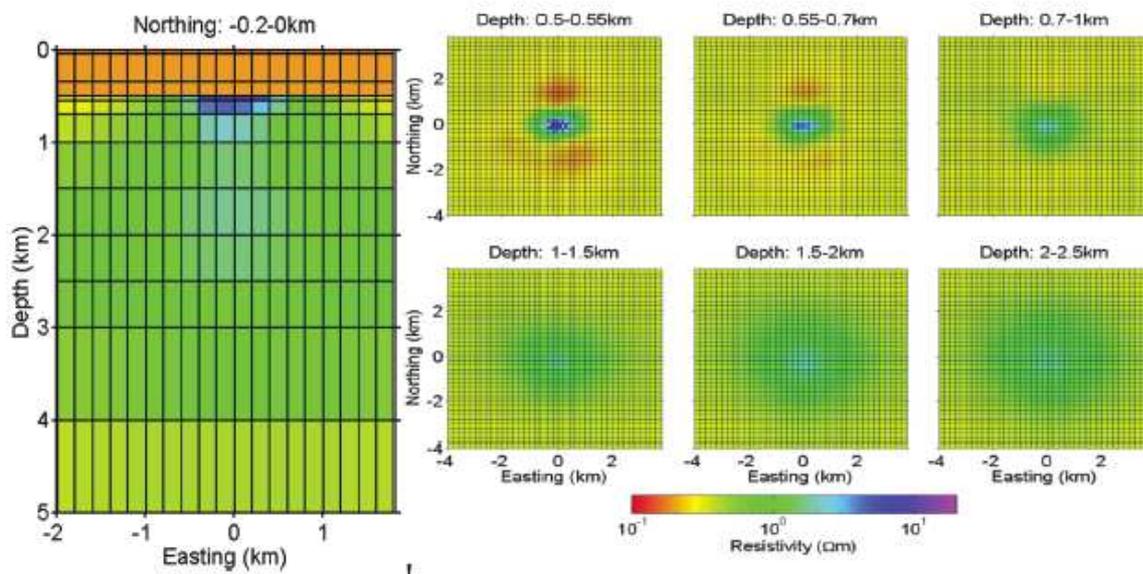


Abb. 16: Resultate einer 3D Inversion der niederfrequenten, magnetotellurischen Daten, welche die Hybridinstrumente gleichzeitig mit den aktiven Daten auf dem Schlammvulkan aufgezeichnet wurden. Eindeutige Leitfähigkeitsanomalien in Meeresbodennähe werden mit einer Gasblase assoziiert, eine Anomalie in ca. 2 km Tiefe mit der Aussüßung durch Entwässerung von Tonmineralien.

Der zusätzliche Informationsgewinn durch die Hybridinstrumente zeigt sich in Abb. 16. Hier wurden die niederfrequenten MT Daten, bestehend aus elektrischen und magnetischen Feldvariationen, analysiert und durch eine MT-Dateninversion auf ein 3D elektrisches Leitfähigkeitsmodell zurückgeführt. Geologische Prozesse, die für das Verständnis von Schlammvulkanen relevant sind, wie die durch Tonmineral-Entwässerungsprozesse erzeugte Aussüßung der Porenfluide in ca. 2 km Tiefe sowie eine Gasblase im oberen Bereich, sind eindeutig in dem Modell zu erkennen.

*(b) Entwicklung von Dateninterpretationsalgorithmen*

Eine wahre Ausreizung der Daten, die mit dem neuen 3D System akquiriert wird, kann aber nur anhand einer 3D Inversionssoftware und der Verbindung mit seismischen Daten ausgeschöpft werden. 3D Dateninterpretations- und Modellierungsalgorithmen sollen innerhalb von SUGAR II entwickelt und auf Methanhydratmessungen angewandt werden. Erste Ansätze der gemeinsamen Dateninterpretation von seismischen und elektromagnetischen Daten wurden jedoch schon in der ersten Phase verfolgt. Abb. 8 zeigt ein seismisches Geschwindigkeits- und ein Widerstandmodell, welches eine Gashydratschicht in einer Tiefe von 1000 m beinhaltet und welches zu einer Konzeptentwicklung benutzt wurde. Die Gashydratschicht basiert auf einer Annahme eines 100 m dicken Sandsteinreservoirs mit 25% Porosität, wobei die oberen 50 m des Porenraums 90% Gashydrat und der untere Porenraum des Reservoirs kein Gashydrat enthält. Die Gesteinsparameter wurden anhand der Gassmann-Gleichung und des Gesetz von Archie mit der für die Geologie typischen Konstanten in seismische und elektrische Widerstände umgerechnet. Die synthetischen CSEM Daten sind in Abb. 17 in Form von Amplituden als Funktion des Offsets für eine Frequenz von 1 Hz dargestellt. Ein Vergleich der Daten berechnet für ein Model mit und ohne Schicht, zeigt, dass die CSEM Daten sehr empfindlich auf die Methanhydratschicht reagieren. Als erster Ansatz wurden "Traveltimes" für die Integration seismischer Daten gewählt. Der Verlauf der drei Reflektionen an der Ober- und Unterkante der Sandsteinschicht und Unterkante der Methanhydratschicht sind unterhalb des seismischen Models abgebildet.

Ziel einer jeden geophysikalischen Messung ist die Herleitung eines Models, welches den Daten entspricht. Für eine solche Dateninversion wird der Modelraum diskretisiert und jedem Modelement ein physikalischer Parameter zugeordnet. Die Modellparameter werden nun solange variiert, bis die sich aus dem Modell ergebenden Daten mit den gemessenen Daten übereinstimmen. Das Maß dieser Übereinstimmung ist der sogenannte " $\chi^2$  Misfit" und kann für die CSEM als

$$\chi_{CSEM} = \sqrt{\frac{1}{N_{CSEM}} \sum_{i=1}^{N_{CSEM}} \left[ \frac{(E_i^{calc} - E_i^{obs})}{dE_i} \right]^2}$$

definiert werden. Hierbei bezeichnen  $E_{\text{calc}}$  und  $E_{\text{obs}}$  den aus einem Modell berechneten und den gemessenen Datensatz der Größe  $N_{\text{CSEM}}$  und  $dE$  den Fehler in den gemessenen Datenpunkten. In Abb. 18a ist der "Misfit" der CSEM Daten unseres Modells und Daten, die sich als Funktion der Gashydratschichtdicke und ihrer Sättigung ergeben, dargestellt.

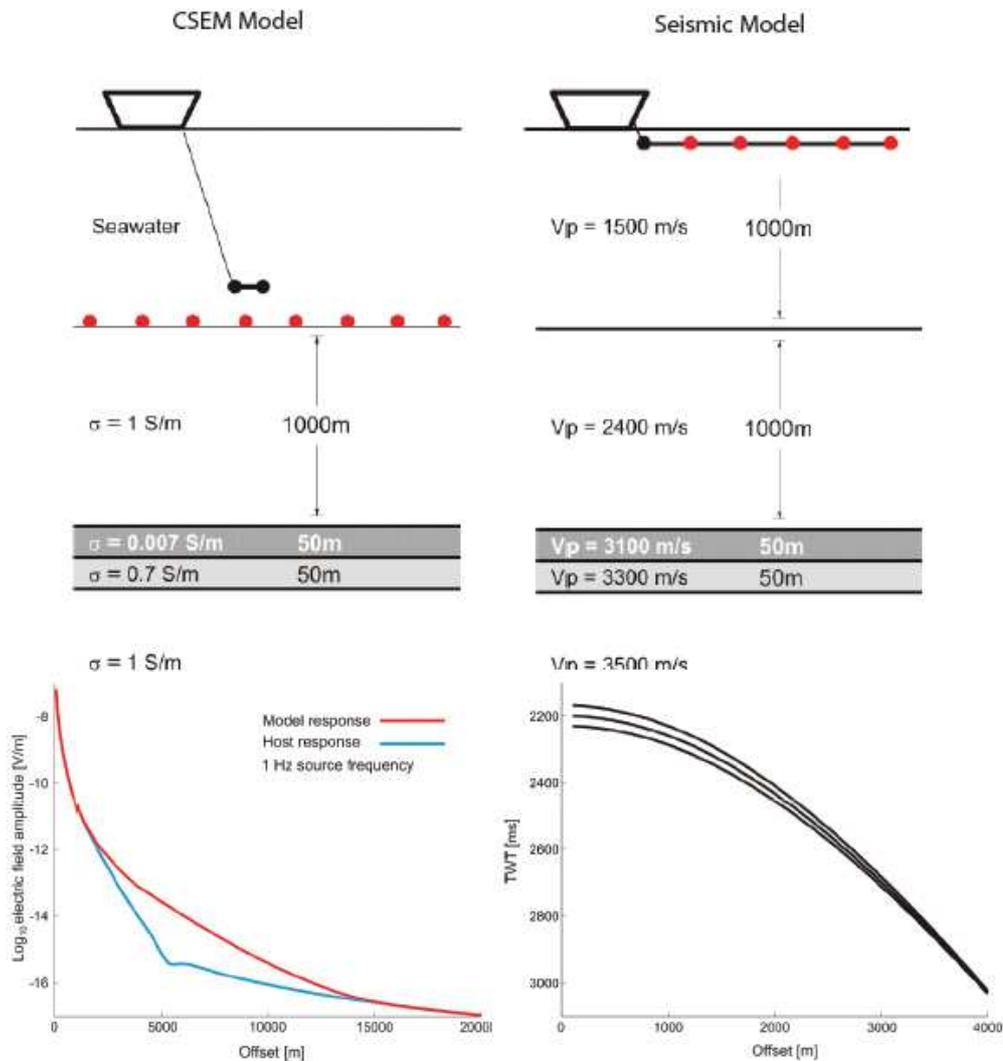


Abb. 17: Elektromagnetisches Widerstandsmodell (oben links) und seismisches Geschwindigkeitsmodell (oben rechts), die zur Entwicklung eines kombinierten Dateninterpretationskonzepts benutzt wurden. Die Modelle enthalten ein 100 m dickes Sandsteinreservoir mit einer Porosität von 25%, dessen oberer Porenraum zu 90% mit Methanhydrat gefüllt ist. Die entsprechenden Widerstände und Geschwindigkeiten wurden anhand des Archie-Gesetzes und der Gassmann-Gleichung berechnet. Die in der Analyse berücksichtigten elektromagnetischen Daten, bestehend aus Amplituden als Funktion der Sender-Empfänger-Distanz für ein Signal mit 1 Hz und den seismischen "Traveltime"-Daten, sind unten links und rechts dargestellt.

Modelle mit geringer Abweichung (blaue Tönung) entsprechen den gemessenen Daten, das wahre Modell ist mit einem weißen Punkt gekennzeichnet. Aus der Abbildung lässt sich schließen, dass es eine Vielzahl von Modellen gibt, die den gemessenen Daten entsprechen. Obwohl die CSEM, wie in Abb. 17 gezeigt, empfindlich auf die Präsenz der Methanhydrate reagiert, kann aus diesem einzelnen Datensatz keine eindeutige Modellerkenntnis gewonnen werden. Zwar ist der Sättigungshalt insbesondere im Vergleich zu den seismischen Daten relativ gut bestimmt, allerdings lässt sich die Schichtdicke nicht eindeutig aus den Daten herleiten. Dies kann zwar zum Teil darauf zurückgeführt werden, dass hier nur Daten mit einer Frequenz berücksichtigt werden, liegt jedoch auch in der Tatsache begründet, dass CSEM eine diffusive Erkundungsmethode ist, mit der man keine detaillierte Struktur erkennen kann.

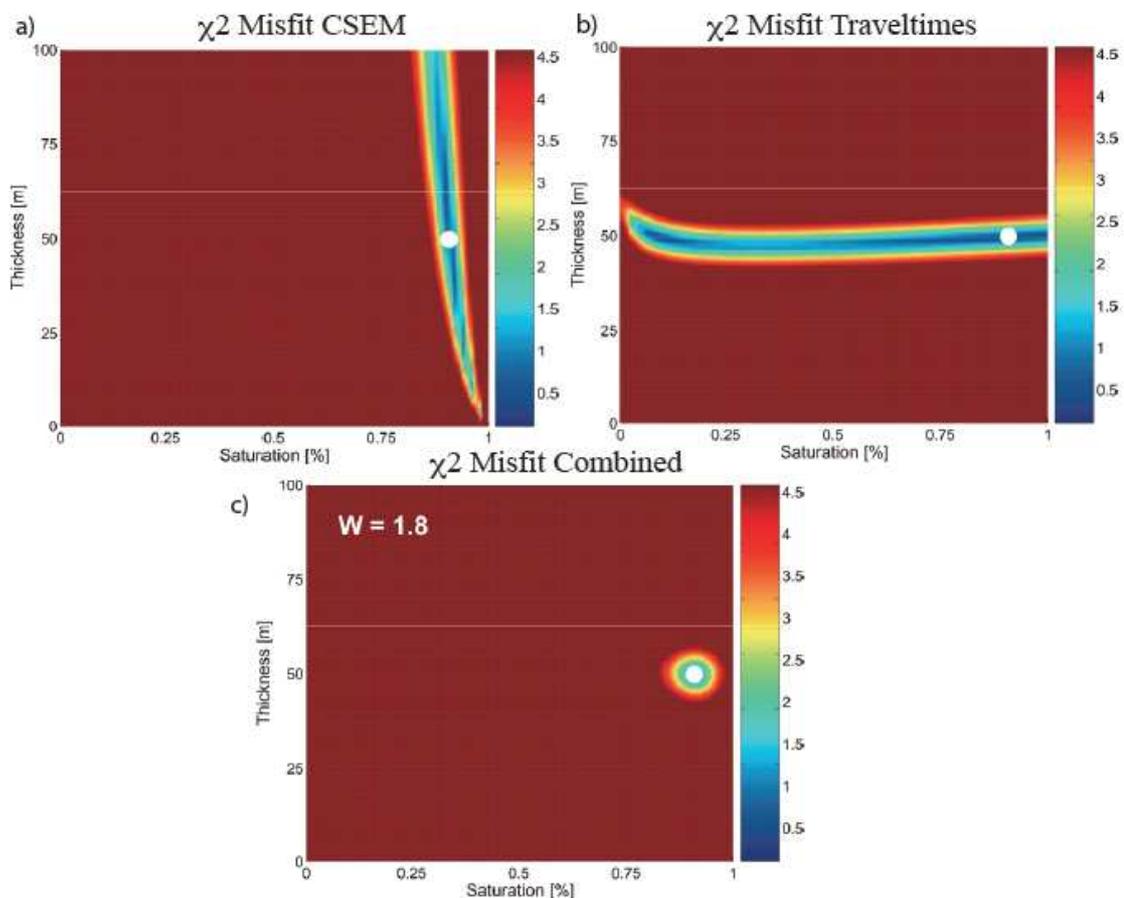


Abb. 18: Abweichung ("Misfit") der in Abb. 17 gezeigten, synthetischen Daten mit Daten, die für Modelle mit Methanhydratschichten verschiedener Sättigung und Dicke berechnet wurden. Modellräume, die die Daten erklären können, haben eine blaue Färbung. Das wahre Modell wird durch einen weißen Punkt gekennzeichnet. Der "Misfit" für elektromagnetische Daten (oben links) zeigt, dass die Sättigung aus den Daten bestimmt werden kann, allerdings wenig strukturelle Information enthält. Der "Misfit" der seismischen Daten (oben rechts) zeigt, dass die Schichtdicke, jedoch nicht die Sättigung, aus den "Traveltime"-Daten hergeleitet werden kann. Anhand einer kombinierten Datenanalyse (unten) kann sowohl Schichtdicke als auch Sättigung bestimmt werden.

Für seismische Daten lässt sich ein ähnlicher "Misfit" als

$$\chi_{Seismic} = \sqrt{\frac{1}{N_{Seismic}} \sum_{i=1}^{N_{Seismic}} \left[ \frac{(t_i^{calc} - t_i^{obs})}{dt_i} \right]^2}$$

definieren, wobei  $t_{calc}$  und  $t_{obs}$  die "Traveltimes" des seismischen Datensatzes der Größe  $N_{Seismic}$  sind und  $dt$  der Fehler in den einzelnen Datenpunkten. Der seismische "Misfit" ist wiederum als Funktion der Gashydratschichtdicke und Sättigung in Abb. 18b zu sehen. Auffallend ist der komplementäre Informationsgehalt: während sich aus den seismischen Daten diesmal nicht die Sättigung ableiten lässt, kann die Dicke der Schicht sehr gut bestimmt werden.

Damit liegt ein wesentlicher Vorteil der kombinierten seismischen-CSEM Datenanalyse auf der Hand: Nur die Schnittmenge der Lösungsräume der einzelnen Datensätze kann beide Datensätze gleichzeitig anpassen. Diese wesentlich kleinere Schnittmenge lässt sich als Kombination der einzelnen "Misfits" darstellen:

$$\chi_{Joint} = \frac{1}{1+W} \sqrt{\chi_{CSEM}^2 + W \chi_{Seismic}^2}$$

wobei  $W$  ein Gewichtungsfaktor ist, der so gewählt wird, dass die einzelnen "Misfits" ähnliche Größenordnungen haben. Der kombinierte "Misfit" für unser synthetisches Beispiel ist in Abb. 18c dargestellt. Die Anzahl der Modelle, welche beide Datensätze gleichzeitig erklären können, ist nun sehr klein und um das wahre Model zentriert. Die kombinierte Datenanalyse erlaubt also sowohl Schichtdicke als auch Methanhydratsättigung zu bestimmen.

Das an synthetischen Daten ausgearbeitete Konzept wurde nun auch an dem Schlammvulkandatensatz ausprobiert. Abb. 19a zeigt seismische Daten, anhand derer direkt unterhalb des Meeresbodens eine Gasblase nachgewiesen werden konnte. Die durch einen seismischen Streamer aufgenommenen "Traveltimes", die sich im Eindringgebiet einer Sender-Empfängerkombination der elektromagnetischen Daten befinden, sind rot in Abb. 19a gekennzeichnet. Der zugehörige elektromagnetische Datensatz ist in Abb. 19b dargestellt. Abb. 19c-e zeigen den Daten-"Misfit" der seismischen und elektromagnetischen Daten und des kombinierten Datensatzes. Nur die Kombination der Datensätze erlaubt eine Bestimmung der Gasschichtdicke von ca. 150 m und einer Gassättigung von 25%.

Zusammenfassend kann aus der vorgestellten Analyse aus synthetischen und Felddaten das Fazit gezogen werden, dass die genaue Bestimmung von Methanhydratkonzentrationen eine integrierte Datenanalyse zwingend erfordert. Die vereinfachende Annahme eines einfachen, geschichteten Halbraums ist zur Illustration und zum Konzeptbeweis der Datenanalyse vertretbar. Da Methanhydrate in den seltensten Fällen jedoch geschichtet vorliegen, müssen für

die reale Anwendung die Modellierungs- und Inversionsalgorithmen auf 3D ausgeweitet und dem 3D Messkonzept angepasst werden.

Dieser Schritt erfordert aber als erstes 3D Modellierungsalgorithmen, mit denen Daten für verschiedene 3D Modelle berechnet werden können. Während es viele 3D seismische Algorithmen auch allgemein zugänglich gibt, sind die elektromagnetischen Algorithmen weniger weit verbreitet. Für die Datenanalyse sind weiterhin viele Vorwärtsrechnungen nötig, weshalb der Algorithmus möglichst schnell sein sollte. Ein in Island entwickelter 3D Code von Knut Arnason simuliert elektromagnetische Daten, die ideal an das Messkonzept angepasst sind. Die notwendige Anpassung von Landmessungen auf marine Messungen sowie eine Laufzeitverringerng durch eine Parallelisierung auf Graphical Processor Units wurden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt.

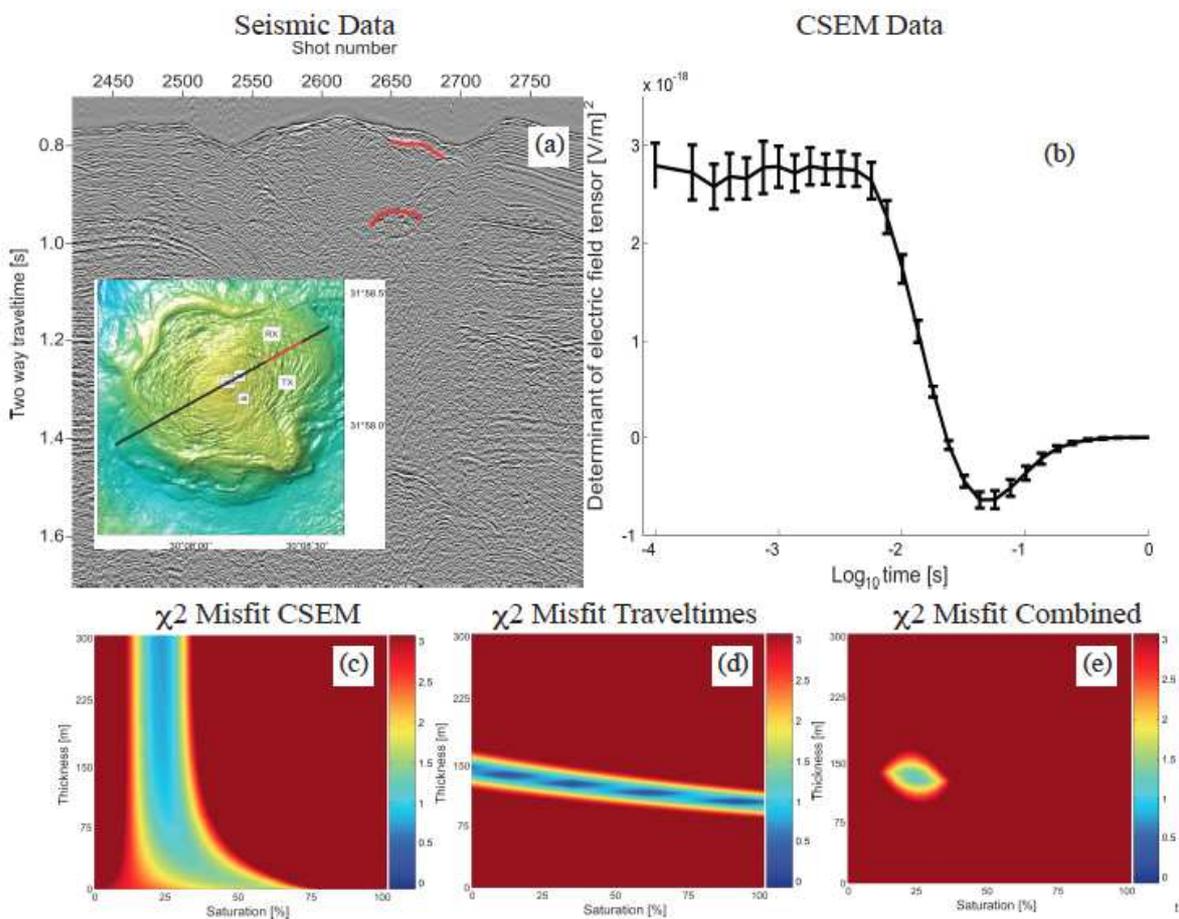


Abb. 19: Anwendung des kombinierten Interpretationskonzepts auf "Traveltime"-Daten aus 2D Streamerdaten (a) vom Schlammvulkan im West-Nil-Delta (schwarze Linie in der Übersicht) und elektromagnetischen Daten (b) aus Sender-Empfänger-Paaren (weiße Quadrate in der Übersicht). Die benutzten "Traveltime"-Daten (rote Linien in a) stammen von Reflektionen an der Ober- und Unterkante einer Gasblase. Der Lösungsraum für elektromagnetische und seismische Daten (c) und (d) kann durch eine Kombination (c) eingeschränkt werden, was eine Bestimmung der Gasblasendicke und Sättigung erlaubt.

#### *A4 – Modellierung*

Die Arbeiten im Teilprojekt A4 konzentrierten sich im Wesentlichen auf zwei größere Themenfelder. Dies waren: (i) die Implementierung und Anwendung des Gashydratmoduls in PetroMod® sowie (ii) die Entwicklung neuer Ansätze zur Abschätzung globaler Gashydratvorkommen. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus beiden Gebieten dargestellt.

Seit Sommer 2008 wurde gemeinschaftlich mit IES-Schlumberger (AaTC) ein Softwaremodul für die Erweiterung des PetroMod Simulators entwickelt. Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten bezogen sich auf (i) die für die Simulation von Gashydratvorkommen notwendige Verbesserung des räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögens des Simulators (Nested-Model), (ii) die Implementierung physikalischer und thermodynamischer Kenngrößen zur Modellierung von Gashydraten (z.B. Berechnung der Gashydrat-Stabilitätszone, Löslichkeit von Methan, etc.; erarbeitet im SUGAR Teilprojekt B1-4) und (iii) die Bereitstellung und Implementierung kinetischer Gleichungen zur biogenen Bildung von Methan im Untergrund sowie der Bildung und Auflösung von Gashydraten. Mit dem „Nested-Model“ ist es im Vergleich zur Standardsoftware möglich, die Zeitschritte in der Berechnung auf bis zu 100 Jahre zu verringern und die Kantenlänge einzelner Zellen auf bis zu 10 cm zu verkleinern. Tests haben gezeigt, dass diese Auflösung für die Darstellung von Gashydraten ausreichend ist und zudem kaum genauere Informationen über räumlich-strukturelle Zusammenhänge auf Basis von Grundlagendaten, z.B. seismischer Profile, zu erwarten sind. Desweiteren ermöglichen neu entwickelte Schnittstellen eine verbesserte Funktionalität. So wurde beispielsweise ein „Lithologie Editor“ entwickelt, der es ermöglicht, bestimmte Gesteinstypen aus der PetroMod Lithologiedatenbank in die Modellierung von Gashydratlagerstätten mit einzubeziehen. Außerdem wurde eine Oberfläche erstellt, die es ermöglicht Gashydratlagerstätten anhand von „Overlays“ in den „PetroMod Viewern“ (Applikationen zur optischen Darstellung der gerechneten Modelle) anzuzeigen, womit sowohl räumliche Darstellungen der „Gashydrat-Sättigung“ als auch Berechnungen zur absoluten Menge von Gashydraten möglich sind. Der weltweit größte Anteil an submarinen Gashydratvorkommen geht auf die Bildung biogenen Methans in Sedimenttiefen von wenigen hundert Metern sowie geringen Temperaturen zurück. Bekannte kinetische Formulierungen (Middelburg, 1989; Wallmann et al., 2006) konnten aufgrund software-spezifischer Probleme noch nicht vollständig implementiert werden. An diesem Problem wird derzeit seitens AaTC weiterarbeitet. Allerdings ist es möglich, über den „Kinetics editor“ biogene Abbaukinetiken zu formulieren, die bekannte Formulierungen in ausreichender Form annähern. Ein solches Beispiel ist in Abb. 20 gezeigt. Abweichungen der Funktion „BioMethane“ zu der von Middelburg (1989) bestehen hier nur für einen unbedeutenden Temperaturbereich.

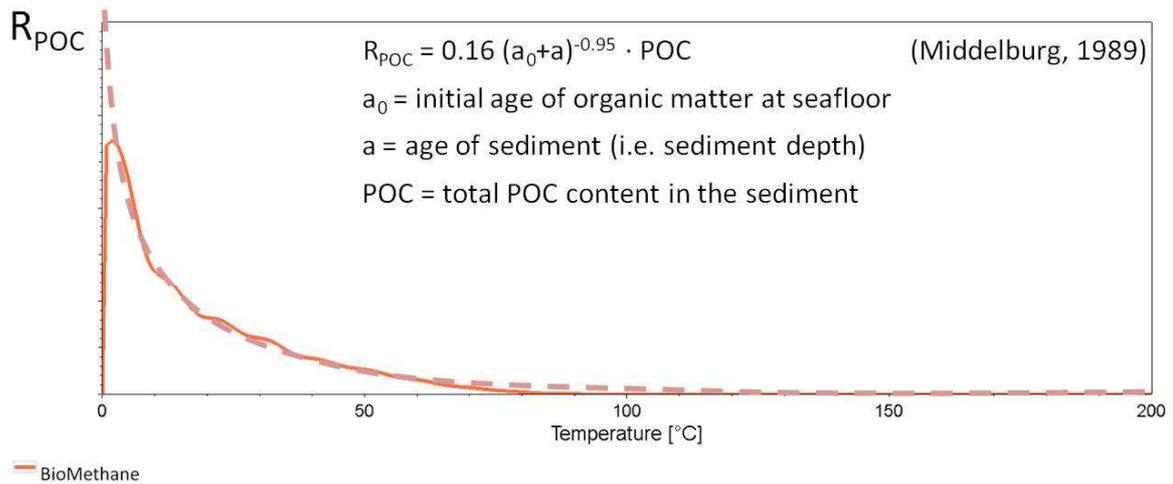


Abb. 20: Abbauraten organischer Substanz ( $R_{POC}$ ), im Modell gleichzusetzen mit der biogenen Bildung von Methan, nach Middelburg (1989) und „BioMethane“ (innerhalb des „Kinetics editor“ erstellte Formulierung).

Konkrete Modellierungen von Gashydratvorkommen mit dem PetroMod Simulator wurden bislang für das zu Explorationszwecken geologisch sehr genau untersuchte Gebiet an der Küste Nordalaskas (Alaska North Slope, Mount Elbert) durchgeführt, für das bereits ein großräumiges 3D-Beckenmodell vorlag (Abb. 21). Der USGS (United States Geological Survey) exploriert seit 2001 intensiv die dortigen Gashydratvorkommen und führt dort derzeit erste Feldtests zum Hydratabbau durch.

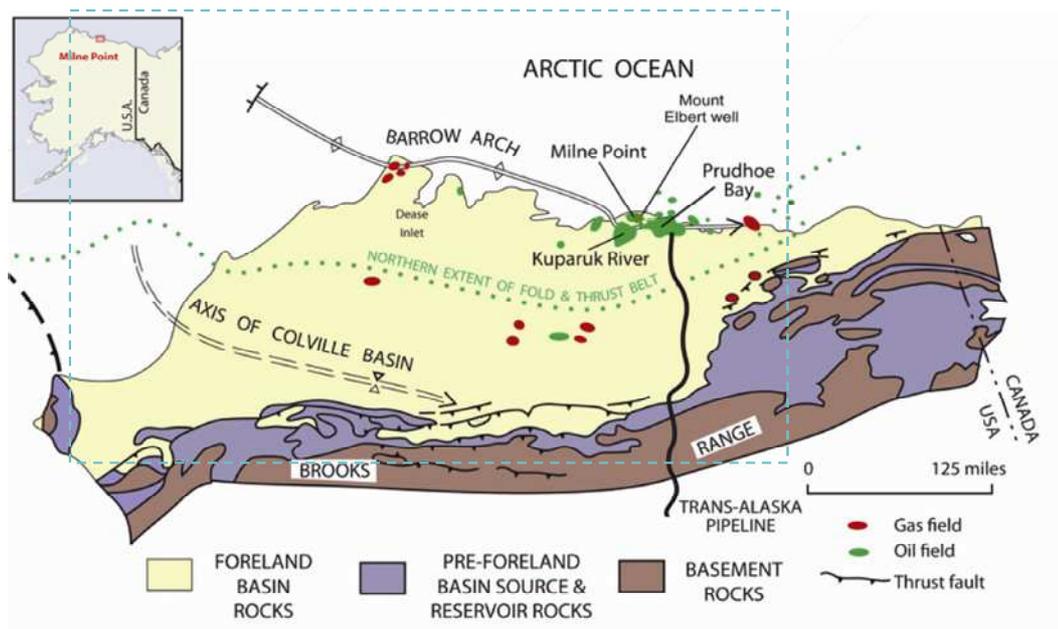


Abb. 21: Lage des Testgebietes „Alaska North Slope“ (Boswell et al., 2011). Die gestrichelte Linie beschreibt das PetroMod Modellgebiet.

Erste Modellergebnisse hierzu konnten im Juli 2011 auf der „International Conference on Gashydrates“ (ICGH) vorgestellt werden (Pinero et al., 2011c). Abb. 22 zeigt die Entwicklung der Gashydratstabilitätszone im Bereich des Modellgebietes über die letzten 500.000 Jahre. Hiernach zeigt sich, dass die heutigen, für die Gashydratbildung günstigen Bedingungen bereits seit ca. 100.000 Jahren existieren. Die für die heutige Situation modellierte räumliche Erstreckung und Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone ist in guter Übereinstimmung mit Ergebnissen von Collett et al. (2010). Abb. 23 zeigt die räumliche Ausdehnung der Gashydratvorkommen für die rezente Situation sowie eine Abschätzung der Gesamtmenge an vorhandenem Gashydrat (in Megatonnen) am „Alaska North Slope“. Hiernach stammt die größte Menge an Gashydrat aus der biogenen Bildung von Methan. Nur entlang einer größeren, aktiven Störung, gekennzeichnet durch generell höhere Gehalte an Gashydrat, findet offensichtlich eine nennenswerte Migration von thermogenem Methan in die Gashydrat-Stabilitätszone statt.

### EVOLUTION OF THE GAS HYDRATE STABILITY ZONE OVER TIME IN THE ALASKA NORTH SLOPE

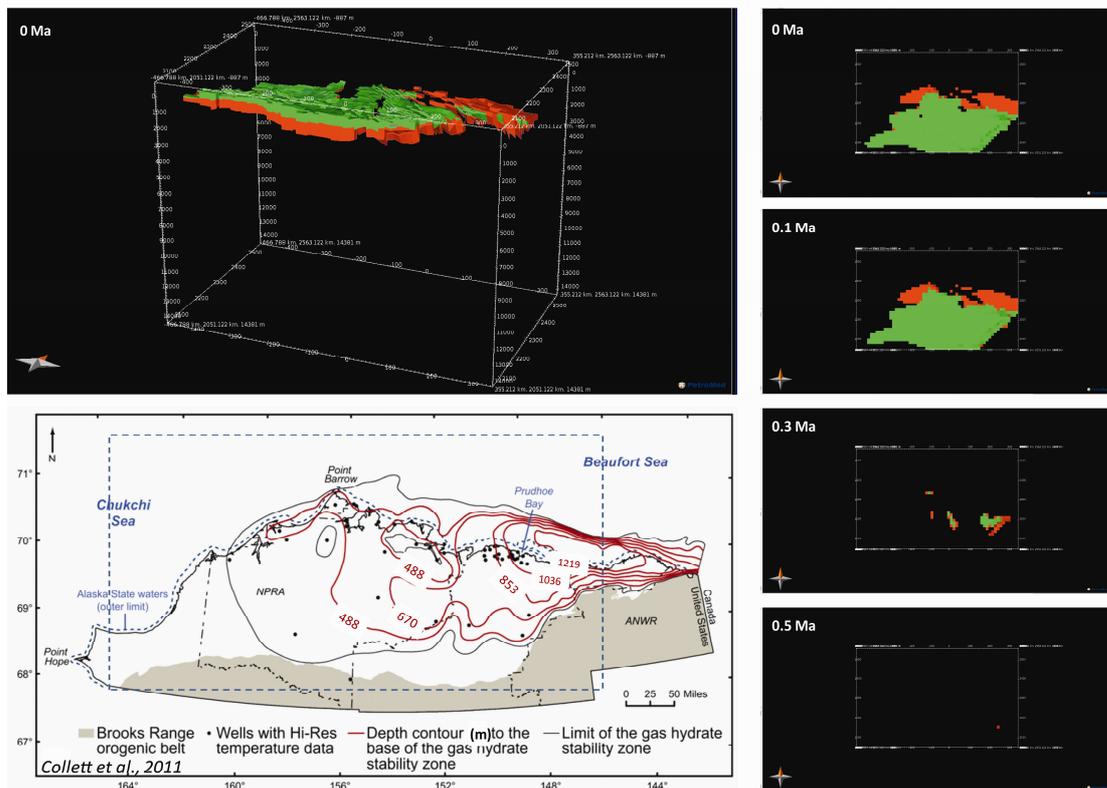


Abb. 22: Entwicklung der Gashydratstabilitätszone über die letzten 500.000 Jahre. Im Vergleich dazu die Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone nach Collett et al. (2011).

Der Anteil an thermogenem Methan beträgt hier ca. 50%. Diese Ergebnisse decken sich derzeit nicht mit Messergebnissen aus verfügbaren Bohrungen, wonach der größte Anteil an Gashydraten in diesem Gebiet aus thermogener Methanbildung stammt (Lorenson et al., 2011). Dies zeigt deutlich die Notwendigkeit für weitere, umfangreiche Sensitivitätstests, um eine

bessere Annäherung des Modells an die konkrete Situation zu erreichen. Diese werden zurzeit im Rahmen von Sugar II in Zusammenarbeit mit dem AaTC und unseren Kooperationspartnern am USGS (T. Collett, T. Lorenson) durchgeführt. Im weiteren Verlauf sind zusätzliche Tests in anderen Gebieten geplant.

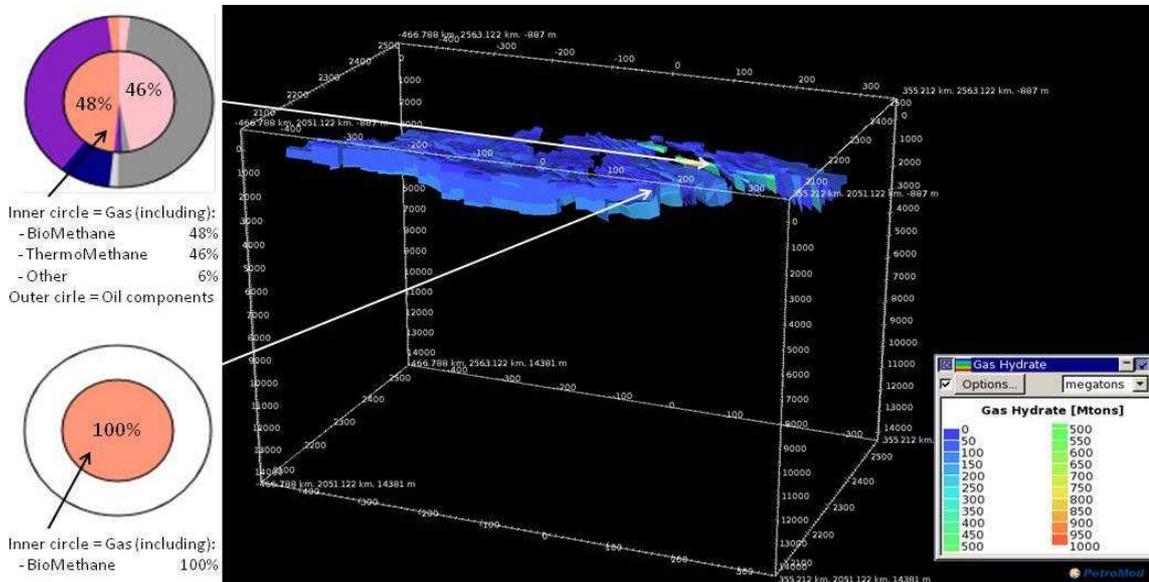


Abb. 23: Gesamtmenge und räumliche Verteilung der Gashydratvorkommen im Modellgebiet „Alaska North Slope“. Ein Großteil der Gashydrate enthält bis zu 100% biogenes Methan (BioMethane). Entlang der Störungszone (höhere Gashydrat-Gehalte) bestehen die Gashydrate zu ca. 50% aus biogenem und thermogenem Methan. In diesem Bereich gibt es auch wenige Prozentanteile (6%) höhere Kohlenwasserstoffe, die nicht in Form von Gashydraten gebunden sind sowie verschiedene Ölkomponenten.

Wie bereits in Abschnitt I erläutert, gibt es seit ca. drei Dekaden Abschätzungen zur globalen Menge an Gashydraten in marinen Sedimenten, die zu sehr uneinheitlichen Ergebnissen geführt haben (Abb. 2). Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Arbeiten sollten zur Klärung der Ursachen für die unterschiedlichen Ergebnisse beitragen und insbesondere hinsichtlich der Grundannahmen zu Steuerparametern, u.a. zum Thema der Abbaukinetik organischer Substanz, zu verbesserten Schätzungen führen. Grundsätzlich basierten unsere Arbeiten auf der systematischen Anwendung eines von Wallmann et al. (2006) entwickelten numerischen Modells. Hieraus sollten die wichtigsten Steuerparameter bei der Bildung von Gashydraten ermittelt und vereinfachte Gleichungen zur Vorhersage von Gashydratmengen entwickelt werden. Die Ergebnisse hierzu wurden von Marquardt et al. (2010) veröffentlicht. Sie zeigen im Wesentlichen, dass das geologische Potenzial zur Gashydratbildung vor allem von zwei Steuergrößen, der Akkumulation organischer Substanz sowie der Größe des Gashydrat-Stabilitätsfeldes abhängt. Dieses Ergebnis ist in nachfolgender Gleichung zusammengefasst:

$$GHI = a \cdot POCar \cdot GHSZ^b \cdot \exp(-GHSZ^c / POCar / d) + e \quad (1)$$

wobei  $GHI$  die Menge an Gashydrat in  $\text{g CH}_4$  pro  $\text{cm}^2$  Meeresbodenoberfläche,  $POCar$  die Akkumulationsrate von organischem Kohlenstoff in  $\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$  und  $GHSZ$  die Mächtigkeit der Gashydratstabilitätszone in  $\text{m}$  ist. Die Koeffizienten sind  $a=0.00214$ ,  $b=1.234$ ,  $c=-3.339$ ,  $d=0.3148$ ,  $e=-10.265$ ).

Da viele grundlegende Parameter zur Bestimmung dieser Steuergrößen, wie z.B. der Gehalt von organischem Kohlenstoff oder der Wärmestrom in marinen Sedimenten, in Form globaler Datensätze vorliegen, konnte die von Marquardt et al. (2010) entwickelte Gleichung auch für die Mengenabschätzung und Verteilung globaler Gashydratvorkommen genutzt werden. Hierzu wurden die Parameter  $POCar$  und  $GHSZ$  auf einem globalen 1-Grad Raster ermittelt und auf dieser Basis die weltweite Verteilung von Gashydraten prognostiziert (Abb. 24).

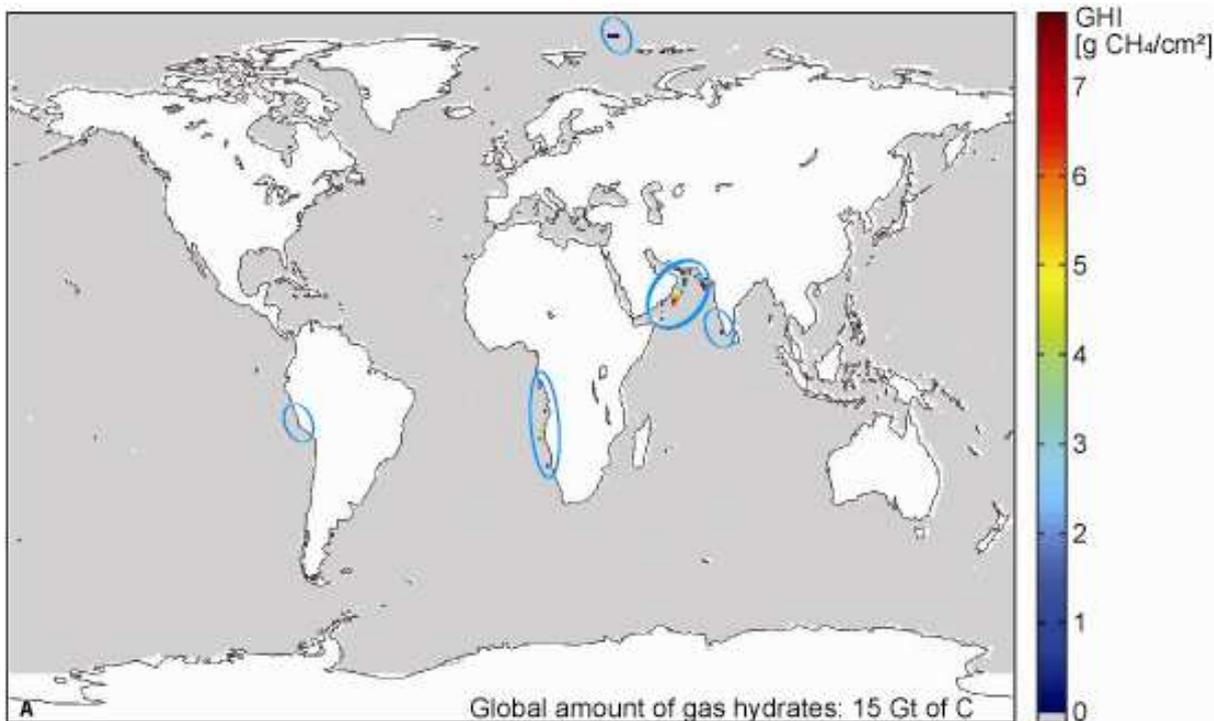


Abb. 24: Geschätzte Gesamtmenge submariner Gashydrate aus biogen gebildetem Methan (nach Marquardt et al., 2010).

Diese liegt mit ca. 15 Gt Kohlenstoff deutlich (ca. 3-4 Größenordnungen) unterhalb der Ergebnisse früherer Schätzungen (vgl. Abb. 2). Die Gründe für die starken Abweichungen liegen einerseits in z.T. fehlerhaften Grundannahmen bei früheren Arbeiten, wie z.B. die Überschätzung der Abbaugeschwindigkeit und -effizienz der organischen Substanz. Zum anderen ist es bekannt, dass größere Gashydratakkumulationen nur durch den Aufstieg von Porenwässern und/oder freiem Gas gebildet werden können (vgl. Abschnitt I). Da es möglich ist, den großräumigen Aufstieg von Fluiden an Kontinentalrändern zumindest grob einzugrenzen,

wurden in einer weiterführenden Studie neue, systemtische Modellierungen mit dem Modell von Wallmann et al. (2006) durchgeführt, mit dem Ziel, die Abhängigkeit der gebildeten Gashydratmenge zum Fluidfluss (FF) analog zu der in Gleichung 1 gezeigten zu entwickeln. Einige Ergebnisse hierzu sind in Abb. 25 gezeigt. Der Einfluss der Fluidadvektion wirkt sich besonders stark aus, sobald die Fluid-Aufstiegsgeschwindigkeit die Sedimentationsrate übersteigt (Bereich des steilen Anstiegs der Kurven in Abb. 25). Die Sedimentationsrate ist implizit in den dargestellten Kurven für POCar enthalten, d.h. bei hohen POCar-Werten, werden umso höhere Fluid-Aufstiegsgeschwindigkeiten benötigt, um substanzielle Effekte hinsichtlich der Gashydratbildung zu erreichen.

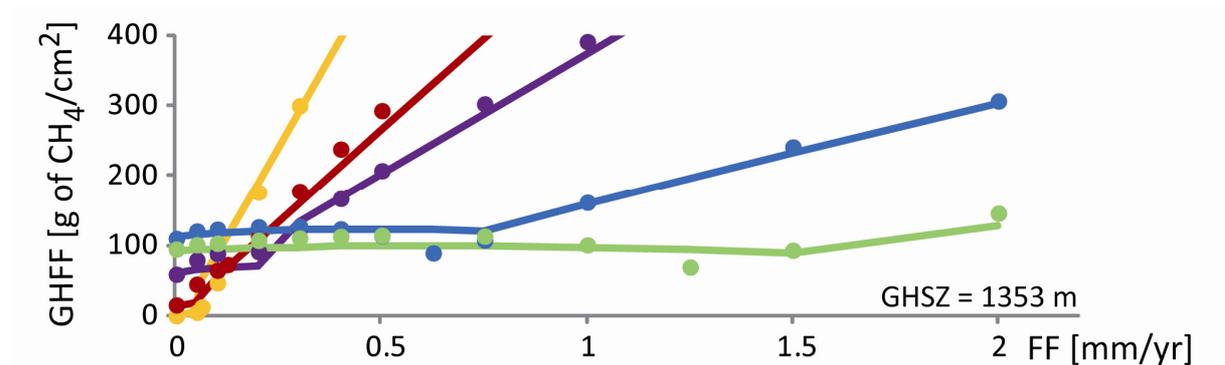


Abb. 25: Berechnete Gashydratmengen in Abhängigkeit zur Fluid-Aufstiegsgeschwindigkeit für unterschiedliche POCar bei gleichbleibender Mächtigkeit der GHSZ (1353 m). POCar-Werte in  $\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ : gelb=0,76; rot=2,21; violett=4,34; blau=17,93; grün=37,4.

Unser derzeit favorisiertes Ergebnis ist in Abb. 26 gezeigt. Unter der Annahme von Fluidaufstiegsraten von  $0.2 \text{ mm yr}^{-1}$  an aktiven sowie  $0.08 \text{ mm yr}^{-1}$  an passiven Kontinentalrändern ergibt sich eine Gesamtmenge von ca. 3000 Gt in Gashydraten gebundenen Kohlenstoffs. Dieses Ergebnis bewegt sich wieder eindeutig im Rahmen früherer Schätzungen, zeigt jedoch erstmalig, dass diese Menge nur durch das Zusammenspiel zwischen Methanproduktion und -advektion erreicht werden kann. Dennoch bleibt zu berücksichtigen, dass die Aufstiegsgeschwindigkeiten von Fluiden oder die Migration von freiem Gas 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.

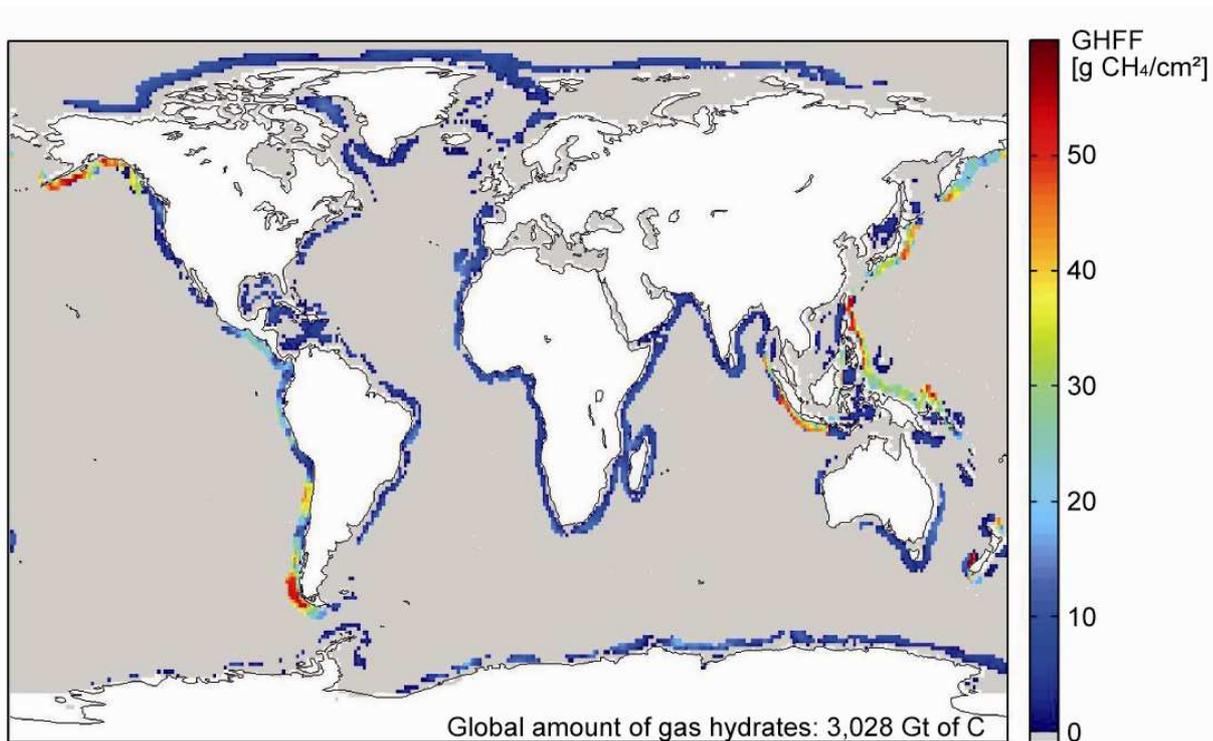


Abb. 26: Geschätzte Gesamtmenge submariner Gashydrate aus biogen gebildetem Methan unter Berücksichtigung vertikaler Fluid-Aufstiegsgeschwindigkeiten (nach Piñero et al., eingereicht).

### Z – Testfahrt

Die Zuwendung im Teilprojekt Z des SUGAR Vorhabens war darauf ausgerichtet eine Testfahrt für neu entwickelte geo-akustische Systeme zu ermöglichen. Es handelt sich hierbei um die Entwicklung zur Vermessung der Wassersäule mit einem Multibeam, der Entwicklung eines tiefgeschleppten Streamers und der Entwicklung einer geschleppten elektromagnetischen Messkette.

Der Einsatz des Multibeamsystems war zu Projektbeginn noch als mobile Plattform angedacht gewesen. Zwischenzeitlich konnte jedoch eine feste Installation umgesetzt werden. Während der Reise wurde dieses System erstmals in Betrieb genommen. Die Untergrundstruktur des Donaugrabens bot hierfür eine geeignete Umgebung, um eine Kalibrierung und Überprüfung der Bordvermessung der Schwinger vorzunehmen. Ein anfänglicher Systemfehler führte zu einem zeitlichen Verschleppen der Messwerte. Die Ursache konnte nicht gefunden werden. Ein Neustart der Gesamtanlage führte aber zur Bereinigung der Fehlschaltung. Mit dem kalibrierten System wurde der Donaugraben bathymetrisch vermessen. Austritte von Gasblasen (Flares) wurden an der Nordflanke erfasst und auf mehreren Profilschnitten mit unterschiedlichen Bereichen des Echolotfächers überfahren. Die Darstellung im Online-Viewer des Systems konnte die Blasen in der Wassersäule klar abbilden. Es zeigte sich aber, dass die

Datenspeicherung und der Datenfluss für eine dauerhafte Online Darstellung nicht geeignet ist. Hier ist nach der Ausfahrt an einer Verbesserung des Konzeptes zu arbeiten.

Die Komponenten des tiefgeschleppten Streamers wurden erst zur Ausfahrt P-405 fertig gestellt. Die komplette Montage erfolgte daher erst an Bord. Ebenso erfolgte hier erstmalig der Anschluss über das Tiefseekabel mit der Telemetrie und Sidescan. Es zeigte sich, dass vor einem ersten Einsatz die Anpassung der Übertragungsparameter der Modems und der Schnittstellenrechner weiter verfeinert werden muss. Ein anschließender erster Einsatz erfolgte zunächst nur bis 200 m Tiefe, um eine Anpassung der Verstärkungswerte für die Hydrophone zu ermöglichen. Während dieser Arbeiten hat ein Wassereinbruch in einem der Knoten zu sehr hoher Stromaufnahme des Systems geführt. Die Neugestaltung der Elektronik bewährte sich dabei, da die Messkette in verkürzter Kontenanzahl einsatzbereit geblieben ist. Vor einer längeren Profilvermessung sollte dieser Fehler aber behoben werden und die Kette wurde später wieder an Bord genommen. Ein abschließend vorgesehene Profil über den in der Literatur publizierten mehrfachen BSR-Reflektoren konnte wegen schlechter Wetterbedingungen (bis 12 Bft.) nicht ausgeführt werden. Die Messkette wurde erfolgreich während der Reise SO-214 vor Neuseeland eingesetzt.

Das geschleppte CSEM System der BGR wurde bereits vor der Testfahrt in Kanada eingesetzt. Hier allerdings nur mit verkürzter Dipolkette. Während der Ausfahrt P-405 wurde dann erstmals die volle Länge von 700 m für die Kette der Empfangsdipole montiert. Mit dieser Konfiguration konnte ein Profil im Bereich der bekannten Mehrfach-BSR vermessen werden. Eine weitere Testmessung von Bord diente zur Untersuchung des Signal-Noise Verhaltens der Empfängerkette. Hier wurden neue Schaltungen der Empfangsmodule getestet, die eine Verbesserung gegenüber der früheren Verkabelung zeigten.

## **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

(Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans, während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen, erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6)

### *A1-1 – Hydroakustik*

Die im Teilprojekt SUGAR A1 geleistete Arbeit war aufgrund ihres Umfangs dem geplanten Projektvolumen mehr als angemessen. Die Arbeit erforderte einen PostDoc mit Expertise in verschiedenen Sach- und Fachgebieten. Aufgrund des hochqualifizierten Projektteams des Projektpartners, der Erfahrung des PostDocs und insbesondere des gegenseitigen

Verständnisses der sowohl technischen als auch methodischen Herausforderungen wurde das Projekt effizient abgewickelt.

Die im Teilprojekt erworbenen Techniken, die Wassersäule entlang eines gesamten Fächers systematisch und hochauflösend zu kartieren, liefert eine Bandbreite neuer Ansätze zur Erfassung, Bearbeitung und Interpretation von zukünftig gewonnenen akustischen Wassersäulendaten. Die bisher entwickelte und getestete Echtzeit-Detektierung von Gasblasen kann auf verschiedene Objekte in der Wassersäule (z.B. Biomasse) erweitert werden. Die verwendeten Algorithmen zur Signalverbesserung einzelner Fächer können für Daten anderer inzwischen WCI-fähiger Systeme umgeschrieben werden und als Grundlage eines Bearbeitungspakets dienen. Die Speicherung von WCI Daten ermöglicht Vergleichsstudien von Wiederholungsmessungen, die im Bereich einer Lagerstättenüberwachung von hohem Nutzen sind.

Während der Laufzeit des Teilprojektes haben sich nur im Zuge des technischen Fortschritts die Fähigkeiten anderer Systeme verbessert, WCI-Daten bereitzustellen. Entwickelte Methoden und Algorithmen zur Detektierung von Gasblasen sind nicht bekannt. Die Aktualität der CCS Technologie und die rasche Entwicklung WCI-fähiger Systeme lässt jedoch die Vermutung zu, dass auch Algorithmen und methodische Ansätze zur Signalverarbeitung und Objekt-Detektierung seitens anderer entwickelt werden.

Die Ergebnisse des Teilprojektes wurden auf folgenden Veranstaltungen veröffentlicht:

- a) Multibeam workshop 2008: Dr. Wilhelm Weinrebe; Mapping deep-water fluid vent sites with multibeam bathymetry and deep tow side-scan sonar, Multibeam workshop 2008 – New Trends and Technologies, 29.09.2008, Kiel.
- b) SUGAR-Projekt-Meeting im IFM GEOMAR: Dr. Wilhelm Weinrebe; SUGAR-Teilprojekt A1: Hydroakustik, Statusbericht; 10.09.2009, Kiel.
- c) DVW Seminar in Hamburg: Dr. Wilhelm Weinrebe und Dr. Ingo Klauke: Kartierung von Fluidaustrittsstellen an Kontinentalrändern mit Fächerecholot und Seitensichtsonar, in Hydrographie – neue Methoden von der Erfassung zum Produkt, Beiträge zum 89. DVW-Seminar am 6. und 7. Oktober 2009, Schriftenreihe des DVW, Wißner-Verlag, Augsburg.
- d) Japanese-German Gas Hydrate Workshop im IFM-GEOMAR: Dr. Wilhelm Weinrebe; SUGAR Sub-Project A1, 11.12.2009, Kiel.
- e) SUGAR NGHP Workshop in Noida (Indien): Dr. Wilhelm Weinrebe, Dr. Christian Zwanzig, Dr. Cord Papenberg; Hydro-Acoustic Gas bubble Detection and Prospecting Techniques; 12.03.2010; DGH Office, Noida, Indien.
- f) Deutsch-Indischer Gashydrat-Workshop im IFM-GEOMAR: Dr. Christian Zwanzig, Dr. Wilhelm Weinrebe, Dr. Cord Papenberg; Hydro-Acoustic Gas Bubble Detection and Prospecting Techniques; 31.08.2010, Kiel.

g) SUGAR Vollversammlung im IFM-GEOMAR: Dr. Christian Zwanzig, Dr. Wilhelm Weinrebe, Dr.- Cord Papenberg; Hydroakustische Erkennung von Gasblasen in der Wassersäule zur Exploration von submarinen Gashydraten; SUGAR-Teilprojekt A1, Statusbericht; 01.09.2010, Kiel.

h) SUGAR-Vollversammlung im IFM-GEOMAR: Dr. Wilhelm Weinrebe, Dr. Cord Papenberg, 29.08.2011, Kiel.

i) Teilergebnisse der WCI Daten-Verarbeitung zur Detektierung von Gasblasen sind Gegenstand einer eingereichten Publikation von Jens Schneider v. Deimling und Cord Papenberg: Technical Note: Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images.

<http://www.ocean-sci-discuss.net/8/1757/2011/osd-8-1757-2011-discussion.html>

k) Eine weitere Publikation ist geplant, um die Ergebnisse der Messfahrt mit FS POSEIDON im Schwarzen Meer vom Dezember 2010, bei der umfangreiche Gasfahnen gefunden wurden, zu veröffentlichen.

#### *A2-1 – Geophysik*

Die schlechten Erfahrungen in Bezug auf Stabilität, Haltbarkeit und Verfügbarkeit eines bis 3000 m Wassertiefe geschleppten Streamers haben eine Neuentwicklung der elektronischen und mechanischen Komponenten notwendig gemacht. Die Schwerpunkte des Projektes wurden dementsprechend durch die Entwicklung neuer digitaler Hydrophonknoten mit integriertem Kompass und Tiefensensor, einem neuen strömungsgünstigem und auftriebsneutralem Druckgehäuse und auftriebsneutralen Kabelsegmenten definiert. Die Neuentwicklungen des elektronischen Designs und des Gehäusekörpers wurden als Unteraufträge vergeben. Ein Nachweis der Funktionalität des neuen Systems wurde im Feldversuch an drei Prototypen geführt. Die weitere technisch wissenschaftliche Einsatzfähigkeit des Gesamtsystems kann neben theoretischen Betrachtungen nur durch den Feldeinsatz eines Komplettsystems nachgewiesen werden. Eine ausreichende Signalqualität für Profilarbeiten kann jedoch nur erreicht werden, wenn eine hohe Überdeckung erzielt wird. Aus diesem Grunde war es notwendig, ein volles System zu fertigen und durch erste Feldaufzeichnungen die Funktionalität der Qualitätskontrolle, die ausreichende Dynamik der Empfänger und die Fähigkeit zur erfolgreichen Integration aller Metadaten in eine nutzbare Schusstabelle zu zeigen. Bedingt durch schlechte Wetterbedingungen während der Testfahrt im Dezember 2010 (Bialas, 2011a) konnte ein erstes komplettes Profil erst während des ersten Projekteinsatzes im März 2011 erfolgreich vermessen werden (Bialas, 2011b).

Bei der Entwicklung der digitalen Elektronik sind besondere Schwierigkeiten durch 1.) die Integration von Drucksensor und Kompass, 2.) schnelle Abtastraten von 0,25 ms, 3.) präzise Synchronisation (us) mit den Überwassereinheiten und 4.) automatische Erkennung des Kettenende vorgegeben. Auf der mechanischen Seite waren für die 1.) Optimierung eines

strömungsgünstigen Druckkörpers, 2.) Integration der externen Sensoren (Druck, Hydrophon), 3.) Durchleitung der Zugkräfte und 4.) die Gestaltung des Auftriebs, neue Konstruktionskonzepte zu entwickeln. Da es sich um die elektronische und mechanische Neugestaltung eines sehr komplexen Messgerätes handelt wurden zunächst nur drei Modulkomponenten gefertigt, um daran die Systemfunktionalität und Praktikabilität im Feldeinsatz zu überprüfen. Die Ergebnisse der Zwischentests im Labor, des erfolgreichen Prototypentest vor der Fertigungsvergabe und die abschließende Kontrolle mit der Testfahrt POS-405 (Bialas et al., 2011) haben nicht nur die erfolgreichen Entwicklungsschritte belegt, sondern auch zum Aufdecken von Schwachstellen geführt, die durch fortlaufende Verbesserungen des Systems beseitigt wurden. Mit dem ersten erfolgreichen Vermessungseinsatz noch während der Laufzeit des SUGAR Projektes konnte die erfolgreiche Arbeit belegt werden (Bialas, 2011b).

Der absehbare Nutzen des Systems konnte bereits während der Expedition SO-214 NEMESYS vor Neuseeland gezeigt werden (Bialas, 2011b). Das Teilprojekt hat die Untersuchung von Methanaustrittsstellen vor Neuseeland zum Ziel. Eine Kernfrage ist das Verständnis der Gasbewegung durch die Hydratstabilitätszone. Auch hochauflösende seismische 2D (1,2 m Binning) und 3D (3,25 m Binning) Vermessungen sind nicht in der Lage, die zugehörigen Förderkanäle ohne Blanking abzubilden. Im Gegensatz dazu ist in der mit dem tiefgeschleppten Streamer aufgenommenen Sektion das Unterschiessen der Austrittsstellen gelungen und eine Abbildung der engen Grenzen der Förderkanäle möglich. Dies wird in zukünftigen Projekten ein wichtiges Hilfsmittel zur Kartierung von Förderkanälen sein. Insbesondere, wenn es darum geht, natürliche Leckagestellen in einer möglichen Hydratlagerstätte zu kartieren. Weiter wird durch die bessere Auflösung die Möglichkeit zur Kontrolle des eingebrachten CO<sub>2</sub> im Monitoring deutlich verbessert. So ist zu erwarten, dass diese Technologie bei zukünftigen Betreibern ihren Absatzmarkt findet. Mit den weiter voranschreitenden Bemühungen Schwermetallsulfate und Erze in der Zukunft am Meeresboden abzubauen, wird der Bedarf nach hochauflösenden Abbildungsverfahren weiter steigen. Auch hier sind mögliche Anwendungen der Technologie zu sehen.

Während der Projektdauer wurde aus Frankreich die Fertigstellung einer neuen tiefgeschleppten Quelle für das PASISAR System, bekannt. Der bisher als Quelle genutzte Helmholtz Resonator arbeitet in einem Frequenzbereich um 1 kHz, welcher über dem mit Airguns erreichbaren Signalbereich liegt. Technische Gespräche mit dem IFREMER haben gezeigt, dass eine Integration nicht möglich ist, da eine grundsätzlich andere Logik in der Systemsteuerung verwendet wird. Über die Erweiterung des früheren Einkanalstreamer des PASIAR ist nichts bekannt.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen:

Während der Testfahrt im Dezember 2010 wurde die Funktionalität des Systems gezeigt und eine Vorstellung der Entwicklungsergebnisse erfolgte in einem Vortrag auf der EGU 2011

(Schleisiek, K., J. Bialas, I. Klauke, and C. Papenberg (2011), Deep Towed Streamer for Seismic Exploration of Shallow Gas-Hydrate Layers, paper presented at EGU General Assembly 2011, EGU, Vienna.).

Die erste erfolgreiche Profilvermessung mit dem tiefgeschleppten Streamer ist während der Reise SO-214 NEMESYS im März 2011 erfolgt. Diese Daten sind noch nicht vollständig ausgewertet. Erste Einkanalabspielungen zeigen aber bereits ein großes Potential, die sonst durch Blanking gekennzeichneten Förderkanäle beleuchten zu können. Die vorläufigen Fahrtergebnisse wurden als IFM-GEOMAR Report veröffentlicht (Bialas, J. (2011b), FS SONNE Fahrtbericht / Cruise Report SO-214 NEMESYS Rep., 174 pp, IFM-GEOMAR, Kiel).

Mit Auswertung des Profils ist die wissenschaftliche Publikation des Ergebnisses in einer Fachzeitschrift geplant.

#### *A2-2 – Elektromagnetik*

Für die Sequestrierung von Methanhydraten ist die genaue Quantifizierung der vorliegenden Methanhydrate von zentraler Bedeutung. Innerhalb dieses Teilprojektes wurden sowohl Entwicklungen von neuartigen Messsystemen als auch Interpretationsalgorithmen durchgeführt. Auf der Hardwareseite wurde ein neuartiger elektromagnetischer Empfänger entwickelt, mit dem tomographische Vermessungen der durch Methanhydrate hervorgerufenen Leitfähigkeitsanomalien durchgeführt werden können. Das System konnte erfolgreich in einem Feldtest auf einem Schlammvulkan in West Nil Delta getestet werden. Desweiteren wurden Konzepte einer zur Methanhydratquantifizierung notwendigen integrierten Datenanalyse von seismischen und elektromagnetischen Daten entwickelt. Die hier entwickelten Instrumente werden in der 2. SUGAR-Phase in einem Feldtest zur 3D Methanhydraterkundung eingesetzt und die Dateninterpretationskonzepte, welche bis jetzt auf geschichteten 1D Modellen basiert, auf 3D Modelle ausgeweitet und auf die gemessenen Daten angewendet.

Ein dem deutschen tomographischen System ähnliches System wurde an der University of Tokyo/Jamstec und University of Kobe entwickelt und 2011 erstmals erfolgreich getestet. An der University of Toronto ist das bestehende geschleppte System in einem von Shell gesponserten Projekt weiterentwickelt worden, sodass interne Datenübertragung nicht mehr analog, sondern digital entlang von Glasfaserkabeln erfolgt.

Aspekte der aus dem Teilprojekt A2.5 erarbeiteten Konzepte wurden in folgenden Arbeiten veröffentlicht:

#### *Wissenschaftliche Artikel*

A. Swidinsky, M. Jegen-Kulcsar, C. Berndt (in Vorbereitung) Concepts for joint inversion of electromagnetic and seismic data for gas and hydrate quantification in marine sediments. Geophysical Journal International.

B.M. Sommer, S. Hoelz, M. Jegen-Kulcsar (in Vorbereitung) GPU based parallelization of the code Time domain EM code for marine CSEM. Computer and Geosciences.

Jegen, M., Moorkamp M., R. W. Hobbs (akzeptiert) Concepts of Joint Inversion, In: Electromagnetic methods in oil exploration, K. Strack, L. Macgregor (eds.).

#### *Konferenzbeiträge*

Hölz, S. und Jegen, M. (2010) The resistivity structure of the North Alex Mud Volcano as derived from the interpretation of CSEM data, EGU General Assembly 2010, 02.05.-07.05.2010, Vienna, Austria.

Hölz, S. und Jegen-Kulcsar, M. (2009) . CSEM Experiment am Schlammvulkan „North Alex“ im südlichen Mittelmeer, 69. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 23.03.-26.03, Kiel.

Heincke, B., Jegen-Kulcsar, M., Moorkamp, M. und Chen, J. (2009). Comparison of different coupling strategies in joint inversion, AGU Fall Meeting, 14.-19.12.2009, San Francisco, California, USA.

Sommer, M., Heincke, B., Moorkamp, M., Jegen-Kulcsar, M. und Hölz, S. (2010) Adaptation and GPU based parallelization of the code TEMDD for 3D modelling of CSEM data, 20th International Electromagnetic Induction Workshop, 19.09.2010, Giza, Egypt.

#### *A4 – Modellierung*

Die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse stellen, wie oben erläutert, einen wesentlichen Fortschritt bei der Quantifizierung von submarinen Gashydratvorkommen dar, womit die Verwendung der hierfür vorgesehen Mittel im Projekt als gerechtfertigt anzusehen ist. Insbesondere die mittlerweile abgeschlossene Entwicklung des prognostischen Gashydratmoduls innerhalb der Beckensimulations-Software PetroMod® stellt nach derzeitiger Einschätzung der Lage auf dem Erdgas- und Erdölsektor einen Wettbewerbsvorteil dar und verspricht somit mittel- bis langfristig gute Vermarktungschancen. Nach unserer Kenntnis ist der hier verfolgte Ansatz derzeit einzigartig, so dass ein Vergleich zu „Arbeiten an anderen Stellen“ entfällt. Insgesamt kann das Modell als komplementär zu den Reservoirmodellen verstanden werden, anhand derer versucht wird, die Erdgasproduktion aus Methanhydraten, durch Druckerniedrigung, Wärmezufuhr, CO<sub>2</sub>-Injektion oder einer Kombination dieser Methoden zu simulieren (siehe Teilprojekt B1).

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen:

#### *Wissenschaftliche Artikel*

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.

Piñero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K. (eingereicht) Estimation of the global inventory of methane hydrates in marine sediments using transfer functions. Biogeosciences.

#### *Konferenzbeiträge*

Marquardt, M., Henke, T., Hensen, C., Müller, C., Gehrman, R., Wallmann, K., and Piñero, E., 2009. Prediction of Sub-Seafloor gas hydrate inventories by empirical relationships. Goldschmidt Conference. Davos (Switzerland) 21-26th June.

Piñero, E., Marquardt, M., Hensen, C., Haeckel, M., And Wallmann, K., 2010a. Global distribution of gas hydrates in marine sediments: application of a general transfer function. European Geosciences Union (EGU)-10, Vienna (Austria), 2-7th May.

Piñero, E., Hensen, C., Marquardt, M., Haeckel, M. And Wallmann, K., 2010b. Role of in situ organic matter degradation and fluid flow in the global gas hydrate distribution: application of general functions. AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 13-17th December.

Piñero, E., Hensen, C., Haeckel, M., Marquardt, M. And Wallmann, K., 2011a. Constraining the global distribution and amount of methane hydrates in marine sediments. European Geosciences Union (EGU)-11, Vienna (Austria).

Piñero, E., Rottke, W., Fuchs, T., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K., 2011b. 3-D Numerical Modeling of Gas Hydrate Deposits in PetroMod. Taiwanese-German gas hydrate workshop, Kiel (Germany), 11-13th July.

Piñero, E., Rottke, W., Fuchs, T., Hensen, C., Haeckel, M., Wallmann, K., 2011c. 3-D Numerical modeling of methane hydrate deposits. Proceeding of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011).

Rottke, W., Hensen, C., Haeckel, M., Fuchs, T., Piñero, E., Wallmann, K., 2009. Modeling Gas Hydrates – SUGAR A-4. Japanese-German gas hydrate workshop. Kiel (Germany), 10-11th December.

Wallmann, K., Burwicz, E.B., Riepke, L.H., Marquardt, M., Piñero, E., Haeckel, M., Hensen, C., 2010. Constraining the global inventory of methane hydrate in marine sediments. AGU Fall Meeting, San Francisco (USA), 13-17th December.

Wallmann, K., Burwicz, E., Riepke, L., Marquardt, M., Piñero, E., Haeckel, M., Hensen, C., 2011. Constraining the global inventory of methane hydrate in marine sediments. Proceeding of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011).

#### *Z – Testfahrt*

Aufgrund der hohen Stromübertragung für das geschleppte CSEM System der BGR musste eine Spezialwinde ausgeliehen werden. Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurde mit dem NOC ein kostenpflichtiger Leihvertrag vereinbart. Im Verlaufe des SUGAR Projektes und durch die

Kontakte des IFM-GEOMAR zum OFEG Barter-Programm wurde die Winde später kostenfrei zur Verfügung gestellt. Der Testbetrieb des tiefgeschleppten Streamers konnte nur erfolgen, indem auch seismische Signale mit einer Airgun erzeugt werden. POSEIDON besitzt keinen eigenen Kompressor, daher musste ein Aggregat ausgeliehen werden, das mit einem 10 "C Stellplatz an Deck auskommt. Die mobilen Systeme der Senatskommission Ozeanographie wurden alle in 20 "C Container konfiguriert und lassen sich daher nicht auf POSEIDON stellen. Einzig der C4 Kompressor-Container der Fa. E+JE bietet die erforderliche Leistungsdichte und wurde wie beantragt angemietet.

Für alle drei Systeme konnte die Einsatzreife während der Testfahrt gezeigt werden. Als fest installiertes System wird das Multibeam bei zukünftigen Fahrten eine routinemäßige bathymetrische Vermessung erlauben. Zukünftige Fahrten mit POSEIDON greifen bereits in der Aufgabenstellung auf die Verfügbarkeit der Wassersäuleninformation aus dem Multibeam zurück. Eine mobile Version des Systems ist in Neuseeland eingesetzt worden und für weitere Fahrten geplant. Der tiefgeschleppte Streamer und das CSEM System wurden bereits bei folgenden Projekten zur Vermessung von Gashydraten und Gasmigrationswegen eingesetzt. Beide Systeme sind für beantragte Expeditionen mit den SUGAR Partnern (z.B. Taiwan, Indien) vorgesehen. Durch die oben genannten Projektplanungen ist ein Einsatz der Systeme in verwandten Themenbereichen des SUGAR Projektes gesichert. Die Projektleiter sind Mitglieder des SUGAR Projektes und stellen die Ergebnisse der weiteren Arbeit zur Verfügung. Darüber hinaus haben sich aus der Bekanntmachung der Einsatzfähigkeit bereits Nachfragen zu Kooperationen auf internationaler Ebene (Neuseeland, Indien, Saudi Arabien) ergeben, so dass die Werbung für die beteiligten Firmen weiter gestreut wird.

In diesem Teilprojekt ist kein zusätzlich zu dem für die Teilprojekte A1-1, A2-1 und A2-2 genannten Fortschritt bekannt geworden.

Aus der Testfahrt haben sich keine zur Veröffentlichung geeigneten Ergebnisse abgeleitet. Dies war auch nicht zu erwarten, da die Aufgabe in einem Einsatztest der neuen Gerätschaften bestand. Die erfolgten Einsätze der Systeme in anderen Projekten werden aber eine wissenschaftliche Auswertung und Publikation mit sich bringen, in deren Rahmen auch der Verweis auf die Systeme erfolgt.