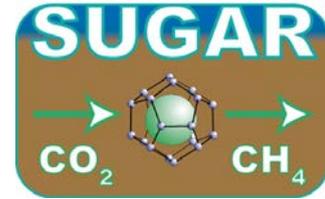


Gefördert von:



Projekt: SUGAR II – Submarine Gashydrat - Ressourcen

Teilprojekt A2-3 : Charakterisierung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten

Vorhaben: Marine CSEM zur Erkundung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten

Zuwendungsempfänger: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, 30655 Hannover

Förderkennzeichen: 03SX320Z

Berichtszeitraum: 01.08.2011 - 30.11.2014

Verfasser: Dr. Katrin Schwalenberg, Dr. Martin Engels, Dr. Dennis Rippe, Dr. Davood Moghadas

## Schlussbericht

### I. Kurze Darstellung zu

#### 1. Aufgabenstellung

Das BGR Teilvorhaben *A2-3 Marine CSEM zur Erkundung und Überwachung von Gashydratlagerstätten* beschäftigt sich mit der Entwicklung, Anwendung und Auswertung von marinen CSEM (controlled source electromagnetic) Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung innerhalb der Gashydratstabilitätszone im Meeresboden. Gashydrate sind elektrisch schlecht leitend im Vergleich zum leitfähigen Porenwasser der Sedimente. Der Formationswiderstand ist deutlich erhöht wo sich ausreichend Gashydrat gebildet hat. Dadurch lassen sich Gashydrate im Meeresboden mit CSEM nachweisen und quantifizieren. Marine CSEM liefert Volumeninformationen und erreicht ähnliche Eindringtiefen wie seismische Verfahren, und liefert damit einen wichtigen Beitrag zur Erkundung von Gashydratlagerstätten im Vorfeld der Methangewinnung und möglichen CO<sub>2</sub> Speicherung, als auch zur Überwachung während und nach der Produktion.

In der ersten SUGAR Phase (2008-2011) ist an der BGR das geschleppte CSEM Messsystem HYDRA I entwickelt worden. Es erfasst insbesondere den für Gashydrate relevanten Tiefenbereich vom Meeresboden bis einige Hundert Meter darunter. HYDRA besteht aus einem 100 m langen, horizontalen, elektrischen Sendedipol und vier

elektrischen Empfangsdipolen, die in Abständen von 150 m bis 750 m über ein Datenkabel miteinander verbunden sind und am Meeresboden entlang von Profilen gezogen werden (siehe Abb. 1). Die Messkonfiguration basiert auf einem früheren System, das an der University of Toronto entwickelt wurde, und über Gashydratvorkommen vor Vancouver Island (Schwalenberg et al., 2005) und am Hikurangi Margin vor Neuseeland (Schwalenberg et al., 2010a, b) eingesetzt wurde. In der ersten Version HYDRA I wird das Sendesignal von einer Signalquelle an Bord generiert, und über das Tiefseekabel zum Sendedipol am Meeresboden geschickt. Mit HYDRA I war keine Online-Kontrolle während des Einsatzes möglich, die Daten wurden erst nach dem Einsatz ausgelesen und prozessiert. Damit war während der Messung keine Qualitätskontrolle möglich. HYDRA I wurde 2010 auf der SUGAR I Testfahrt POS405 auf FS POSEIDON im Schwarzen Meer (Bialas et al., 2011a), und 2011 auf der FS SONNE-Fahrt SO214 (Projekt NEMESYS) vor Neuseeland (Bialas et al., 2011b) zur Erkundung von Gashydratvorkommen eingesetzt. Für die Aufbereitung der Daten wurden Matlab-Routinen geschrieben, die Auswertung erfolgte mit eindimensionalen (1D) Inversionsverfahren.

Die Ziele im SUGAR II Teilprojekt A2-3 waren:

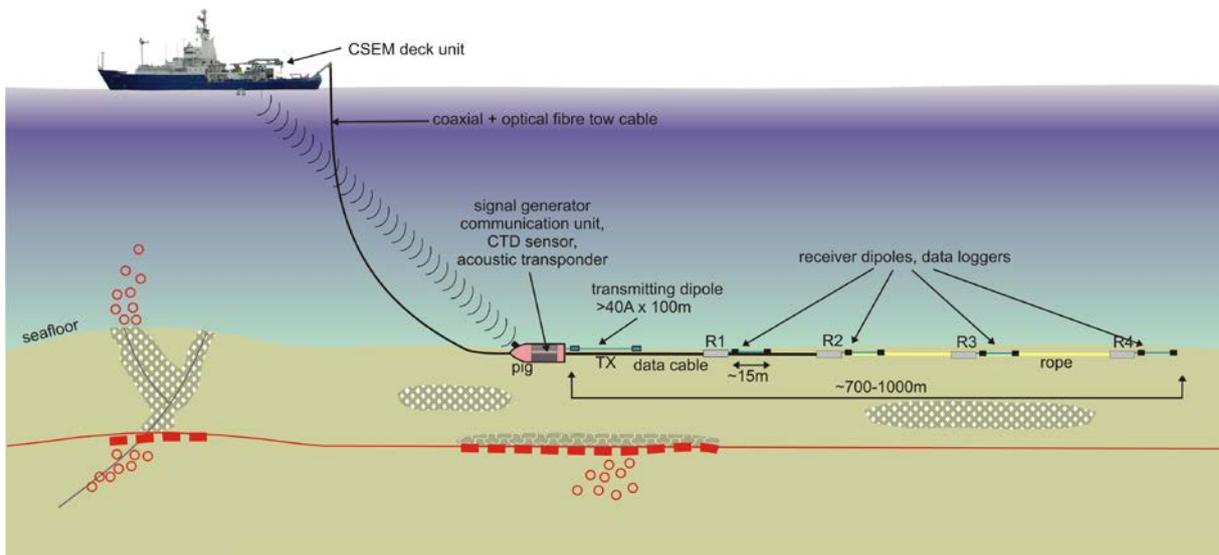
- a) Die technische Hardware und Software-Weiterentwicklung des HYDRA Messsystems zur Online-Kommandierung und Datenübertragung über das Tiefseekabel
- b) Die Prozessierung der gewonnenen CSEM Daten weiterzuentwickeln, um aus den gemessenen Zeitreihen robuste Eingabeparameter für die anschließende Modellierung und Inversion zu berechnen.
- c) Mehrdimensionale Modellrechnungen und eindimensionale Inversionsrechnungen systematisch durchzuführen, um die Auflösbarkeit von Untergrundstrukturen hinsichtlich ihrer elektrischen Widerstandsverteilung zu untersuchen unter der Berücksichtigung topographischer und mehrdimensionaler Effekte sowie seismischer und hydroakustischer Vorinformationen.
- d) Inversion und Interpretation von gemessenen CSEM Daten mit dem HYDRA System über Methanseeps vor Neuseeland, über seismischen Amplitudenanomalien im Flachwasser in der Deutschen Nordsee, und über Gashydratvorkommen im Donaudelta, Schwarzes Meer, zur Standortssuche für einen späteren MeBo-Bohrtest zur Methanproduktion aus Gashydraten
- e) Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des Gashydratpotentials aus flächenhaften elektrischen Widerstandsdaten.

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

Wissenschaftliche Voraussetzungen

In der ersten Phase des SUGAR TP A2.2 *Bewertung submariner Gashydrate mit marinen elektromagnetischen Verfahren* wurden bereits Matlab-Programme zur Auswertung der

CSEM Daten verfasst, um daraus die Eingabeparameter für die anschließende Inversion abzuleiten. Diese Routinen mussten für die neuen Gerätekomponenten (HYDRA II + III,



**Abb.1:**Konfiguration des HYDRA III Messsystems. Signalgenerator und Com-Unit befinden sich im Pig. Receiver Units R1 und R2 sind mit Datenkabel verbunden und können vom Schiff aus angesprochen werden (HYDRA III). R3 und R4 sind mit Seil verbunden. Die Daten werden nach dem Einsatz ausgelesen.

Signalgenerator) erweitert werden. Für die zweidimensionale (2D) Inversion der Neuseeland-Daten mussten Routinen geschaffen werden, um die Daten in den Frequenzbereich zu transformieren. Für die komplexe 3D Modellierung wurde die Finite Elemente Software COMSOL angeschafft.

Zur Abschätzung des möglichen Gashydratpotentials aus elektrischen Widerstandsdaten wird in der Regel Archie's Law angewendet, ein empirischer Ansatz, der Kenntnisse über die Sediment-Porosität, das Porenfluid, und Archie-Faktoren voraussetzt. Da diese Angaben oft nur ungenau sind, sollte hier ein Konzept für eine genauere Abschätzung entwickelt werden. Eine weitere wichtige Voraussetzung, die zum Erfolg des Projekts beiträgt, ist der wissenschaftliche Austausch auf den Spezialgebieten der marinen Elektromagnetik und Gashydratforschung auf Arbeitsgruppentreffen und Fachtagungen.

Technische Voraussetzungen:

Für die technischen Erweiterungen des HYDRA Systems standen keine kommerziellen Lösungen zur Verfügung. Alle neuen Gerätekomponenten sind im Rahmen des Teilprojekts und mit den beauftragten Firmen recherchiert, entwickelt und getestet worden.

Am Ende der SUGAR Phase I war die Entwicklung der erste Version des CSEM Messsystems HYDRA I weitestgehend abgeschlossen. Der erste HYDRA-Testeinsatz 2010 im Schwarzen Meer (POS 405) zeigt jedoch, dass über das Datenkabel Störungen übertragen werden, die im Postprocessing nur teilweise herausgefiltert werden können. Auf der 2011 im Anschluss stattfindenden SONNE-Fahrt SO214 vor Neuseeland wurden diese Störungen umgangen, indem das vordere Datenkabelsegment zwischen Sendedipol (TX)

und erstem Empfangsdipol (R1) durch ein Seil ersetzt und R1 zu einem Receiver-Controller umgebaut wurde. Dieser „Trick“ war erfolgreich, so dass die Datenqualität wesentlich verbessert werden konnte (siehe Abb. 2). Für die Realisierung der Online-Kommandierung musste jedoch eine technische Lösung gefunden werden, um trotz Kabelverbindung zwischen Control- und Receiver-Einheiten störungsarme Daten zu gewinnen. Dies konnte mit HYDRA III auf der MERIAN-Fahrt MSM35 2014 im Schwarzen Meer gezeigt werden.

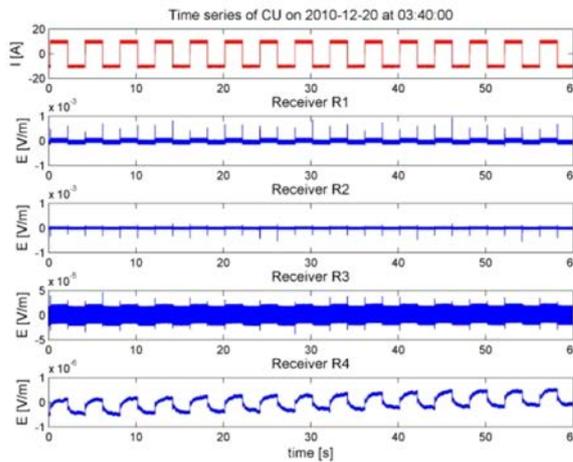
#### Personelle Voraussetzungen

Für die Vorhaben im SUGAR II Teilprojekt A2-3 wurden eine Postdoc- Stelle für 3 Jahre und eine Technische Mitarbeiter Stelle für 18 Monate beantragt und genehmigt. Die PostDoc-Stelle konnte zunächst mit Dr. Martin Engels besetzt werden, der schon im SUGAR I TP angestellt war und die Entwicklung des HYDRA Systems sowie die Datenprozessierung und Auswerteverfahren in Form von Matlab-Routinen bereitgestellt hat. Dr. Engels hat Ende September 2012 auf eine BGR Haushaltsstelle im benachbarten Arbeitsbereich Marine Seismik gewechselt, so dass die Stelle neu besetzt werden musste. Zum 01.02.2013 konnte die Stelle mit Herrn Dr. Davood Moghadas besetzt werden, der sich vorrangig mit der systematischen Modellierung und Inversion mariner CSEM Daten beschäftigt hat. Um den entstandenen Rückstand bei der Erreichung der TP Ziele aufzuholen, ist zum 01.09.2013 eine weitere wissenschaftliche Mitarbeiterstelle für 9 Monate ausgeschrieben worden. Diese Stelle konnte mit Herrn Dr. Dennis Rippe besetzt werden, der zuvor für 6 Monate im NEMESYS Projekt angestellt war und die marinen CSEM Daten vor Neuseeland analysiert und interpretiert hat. Im BGR SUGAR II Teilprojekt hat Herr Rippe zweidimensionale Inversionsrechnungen der Neuseeland-Daten durchgeführt und konzeptionelle Modelle zur Abschätzung des Gashydratpotentials anhand mariner CSEM Daten, insbesondere für die Methan-Seep-Strukturen entwickelt, sowie 3D Modellierungen mit COMSOL durchgeführt.

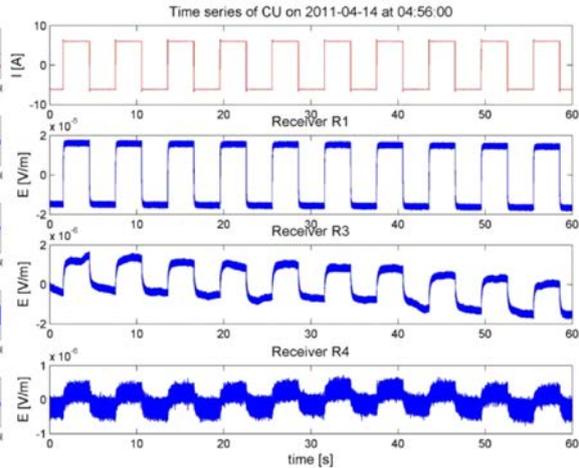
Als technischer Mitarbeiter konnte zum 02.01.2013 Herr Boris Hahn eingestellt werden. Herr Hahn hat die Online-Kommandierung und Datenübertragung der HYDRA III Empfängereinheiten entwickelt und umgesetzt, sowie die Kommandierungseinheit (kurz Com-Unit) für die Spannungsversorgung (Koaxial) und Kommandierung / Datenübertragung (Lichtwellenleiter) über das Tiefseekabel aufgebaut. Herr Hahn hat zum 15.10.2013 auf eine BGR-Haushaltsstelle im benachbarten Arbeitsbereich Marine Seismik gewechselt.

Die technische Mitarbeiterstelle ist aufgrund der nötigen Einarbeitungszeit und verbleibenden Restlaufzeit nicht neu ausgeschrieben worden.

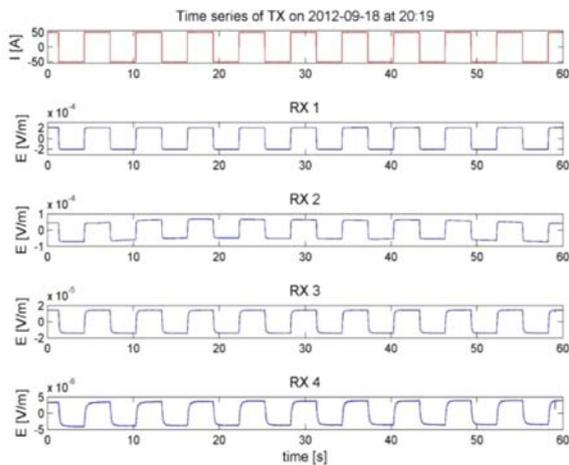
### HYDRA I Testfahrt POS405 Schwarzes Meer, 2010



### HYDRA I mit Seilsegment, SO214 Gashydrate Neuseeland, 2011



### HYDRA II nur Seilverbindung, M88/2 Flachwasser Nordsee, 2012



### HYDRA II+III Online Kommunikation, MSM35 Gashydrate Schwarzes Meer, 2014

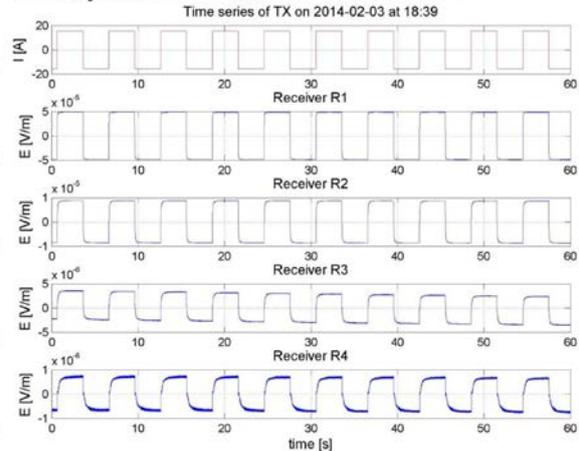


Abb. 2: Zeitreihenbeispiele des HYDRA Systems zeigen die Verbesserung in der Datenqualität von der I. zur III. Generation. Rot: Sendesignal, blau: Receiver-Signale.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der im Antrag vom Januar 2011 vorgestellte Balkenplan zum zeitlichen Ablauf des TP A2-3 hat sich aufgrund der nachträglichen Bewilligung des Projekts und zeitlicher Engpässe bei den Stellenbesetzungen verzögert. Der modifizierte Arbeitsplan wurde im Zwischenbericht vom August 2012 vorgestellt und ist in Tab. 1 noch mal dargestellt:

Tab. 1: Aktualisierter Balkenplan für den zeitlichen Ablauf der Aufgaben im Teilvorhaben A2-3, Stand August 2012

Aufgabe	2011/2	2012/1	2012/2	2013/1	2013/2	2014/1
Technische Weiterentwicklung des CSEM Systems: Datenübertragung mit Kabelmodem und optischem Modem über das Tiefseekabel			X	X	X	
CSEM Datenprozessierung, neue Stapelroutinen		X	X		X	X

Theoretische CSEM Modellstudien und Inversion						X	X		X			
1D und 3D Modellstudien bekannter Gashydratlagerstätten								X	X	X		
Modellstudien zur zeitlichen Entwicklung der Gashydratlagerstätte, Monitoring								X	X	X	X	
Integration der CSEM Ergebnisse mit Seismik, CSEM (Geomar) und Bohrkerndaten									X	X	X	X
Berichte, Publikation				X		X		X		X		X

Die inhaltlichen Aufgaben blieben unverändert.

Der zeitliche Ablauf des Teilprojekts 2-3 ist im Folgenden schematisch aufgeführt:

- 08/2011 Rückwirkender Projektstart
- 11/2011 Ausschreibung der WM Stelle
- 02/2012 Besetzung der WM Stelle mit Dr. Martin Engels
- 02-09/2012 Entwicklung von HYDRA II, autonome Empfängereinheiten mit hochpräziser Atomuhr und optimierter Analog-Elektronik
- 08/2012 Ausschreibung der TM-Stelle
- 09/2012 Einsatz von HYDRA II auf METEOR-Fahrt M88/2 in der Deutschen Nordsee
- 09/2012 Dr. Engels wechselt auf BGR Haushaltsstelle
- 10/2012 Neuausschreibung der WM Stelle
- 01/2013 Besetzung der TM-Stelle mit Herrn Boris Hahn
- 01-10/2013 Beschaffung eines tiefgeschleppten Signalgenerators der in Verbindung mit dem HYDRA Messsystem eingesetzt werden kann.  
Entwicklung der Modemverbindung über Tiefseekabel und Datenkabel zur Online Kommandierung und Datenübertragung.  
Entwicklung und Lieferung von HYDRA III Empfängereinheiten.
- 02/2013 Besetzung der WM Stelle mit Dr. Davood Moghadas
- 02-12/2013 Anpassung des CSEM Datenprozessierung  
Integration der Modellierungs- und Inversions-Routinen in Matlab zur Durchführung und Darstellung systematischer Studien mit Modell- und gemessenen Daten
- 09/2013 Besetzung einer weiteren WM Stelle mit Dr. Dennis Rippe, um den Rückstand in der Dateninterpretation aufzuholen
- 03-10/2013 3D Modellierungen mit COMSOL
- 10/2013 TM Boris Hahn wechselt auf eine BGR Haushaltsstelle. Die Stelle wird nicht neu ausgeschrieben

01/2014	HYDRA III-Einsatz mit neuem tiefgeschleppten Signalgenerator und Com-Unit auf MERIAN Fahrt MSM35 über Gashydratvorkommen im Donau-Delta, Schwarzes Meer. Online-Datenübertragung und Kommandierung über Tiefseekabel erfolgreich getestet.
02/2014	Kostenneutrale Projektverlängerung bis 11/2014 genehmigt. BGR CSEM Teilprojekt ist nicht in SUGAR Phase III vorgesehen.
03-11/2014	Vorläufige Auswertung der CSEM Daten von MSM35. Konzeptentwicklung zur Abschätzung von Gashydratsättigungen aus Widerstandswerten
09-11/2014	Publikationen (1 eingereicht, 2 in Vorbereitung), Abschlussbericht

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

##### Wissenschaftlicher Stand

Marine CSEM ist eine Explorationsmethode, die seit Mitte der 80er Jahre an wenigen Forschungsinstituten, darunter Scripps (University of California San Diego, US), University of Toronto (Canada), Woods Hole Oceanographic Institution (US), Universities of Cambridge / Southampton (UK), Geomar, Kiel, und JAMSTEC, Japan, zur Erkundung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung im Meeresuntergrund entwickelt wurde. Die Anwendungsgebiete waren zunächst Sedimenteigenschaften der ozeanischen Kruste und Hydrothermalsysteme an ozeanischen Rückensystemen. Die Gruppe um Prof. Nigel Edwards an der University of Toronto konzentrierte sich seit Ende der 90er Jahre auf die Exploration submariner Gashydrate. Seit der Jahrtausendwende erfahren marine CSEM Verfahren eine zunehmende Akzeptanz zur Exploration von offshore Öl- und Gaslagerstätten. CSEM (Volumeneigenschaften, Charakterisierung des Porenfluids) und seismische Daten (Struktur, hochauflösend) enthalten komplementäre Informationen. Die gemeinsame Evaluierung der Datensätze erlaubt eine genauere Reservoir Bewertung.

Das gleiche gilt für die Evaluierung von Gashydratvorkommen. Auch hier führt die gemeinsame Auswertung seismischer und CSEM Daten zu einer besseren Beurteilung des Gashydrat-Vorkommen.

Mittlerweile gibt es eine Reihe von akademischen Projekten bei denen marine CSEM zur Gashydraterkundung eingesetzt wurde. Tab.2 gibt eine Übersicht über bekannte Beispiele.

*Tab. 2: Übersicht über international erfolgte marine CSEM Surveys zur Gashydraterkundung und ausführende Institutionen*

Survey Year	Working Area	Institution
2000 - 2006	Cascadia, Western Canada	University of Toronto, Pacific Geoscience Centre
2004	Hydrate Ridge, Oregon	SCRIPPS
2004	Atwater, Gulf of Mexico	WHOI, Southampton
2004	Alpha, Sabah, Malaysia	Shell

2005	Japan Sea	Jamstec
2007	MC118, Gulf of Mexico	Baylor University
2007	Hikurangi Margin New Zealand	BGR
2008	Gulf of Mexico, US	SCRIPPS
2011	Hikurangi Margin New Zealand	BGR
2012	Vestnesa Ridge, Norway	Southampton
2012	Nyegga, Norway	Geomar, Southampton
2013	Taiwan	Geomar
2014	Black Sea, Romania	BGR, Geomar
2014	Nankai Trough, Japan	AIST

Das jüngste Anwendungsbeispiel kommt aus Japan. Ocean Floor Geophysics und SCRIPPS haben 2014 im Auftrag von AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) umfassende CSEM Untersuchungen von Gashydratvorkommen in japanischen Gewässern mit dem neuen VULCAN System von SCRIPPS durchgeführt.

Die BGR hat 2007 erstmalig marine CSEM-Daten über Methan-Austrittsstellen (Seeps) am neuseeländischen Hikurangi Margin akquiriert (SONNE-Fahrt SO-191). Zur genaueren Untersuchung dieser Methan-Austrittsstellen wurden im Rahmen des BMBF Projekts NEMESYS weitere multi-disziplinäre, geologische und geophysikalische Messungen durchgeführt. Diese beinhalteten den Einsatz des geschleppten CSEM-Systems HYDRA auf der Sonne-Fahrt SO-214, bei welcher Daten entlang von drei Profilen über mehrere bekannte Methan-Seeps akquiriert wurden (Abb. 3). Die Auswertung der CSEM-Daten vom Hikurangi-Margin zeigte eine deutliche Korrelation zwischen stark anomalen, elektrischen Widerständen und den von der Seismik und Akustik beobachteten Seep-Strukturen unterhalb des Meeresbodens. Die Ergebnisse lieferten einen deutlichen Hinweis auf hohe Gashydrat-Konzentrationen unterhalb der Seeps (Abb. 4).

Zur Auswertung der Daten mit dem HYDRA System werden eindimensionale (1D) Inversionsprogramme angewendet. Zur Verfügung steht das 1D Programm MARTIN von C. Scholl (pers. Mitteilung), das Occam- und Marquardt-Inversion im Zeit- und Frequenzbereich erlaubt. Eine Kooperation zur 2D-Inversion der CSEM Profildaten wurde mit C. Scholl (CGG Electromagnetics) abgeschlossen. Die Software ist allerdings Eigentum von CGG-EM.

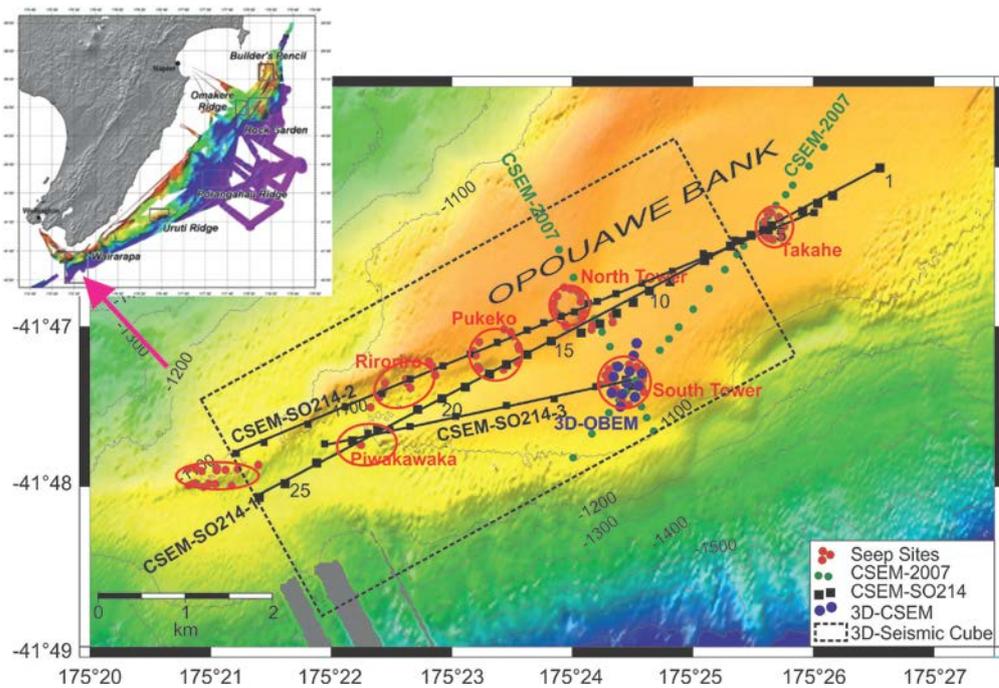


Abb. 3: Bathymetrische Karte vom CSEM Arbeitsgebiet Opuawe Bank SONNE-Fahrt SO-214, mit eingezeichneten Methan Seeps, CSEM Profile und 3D Seismik Würfel.

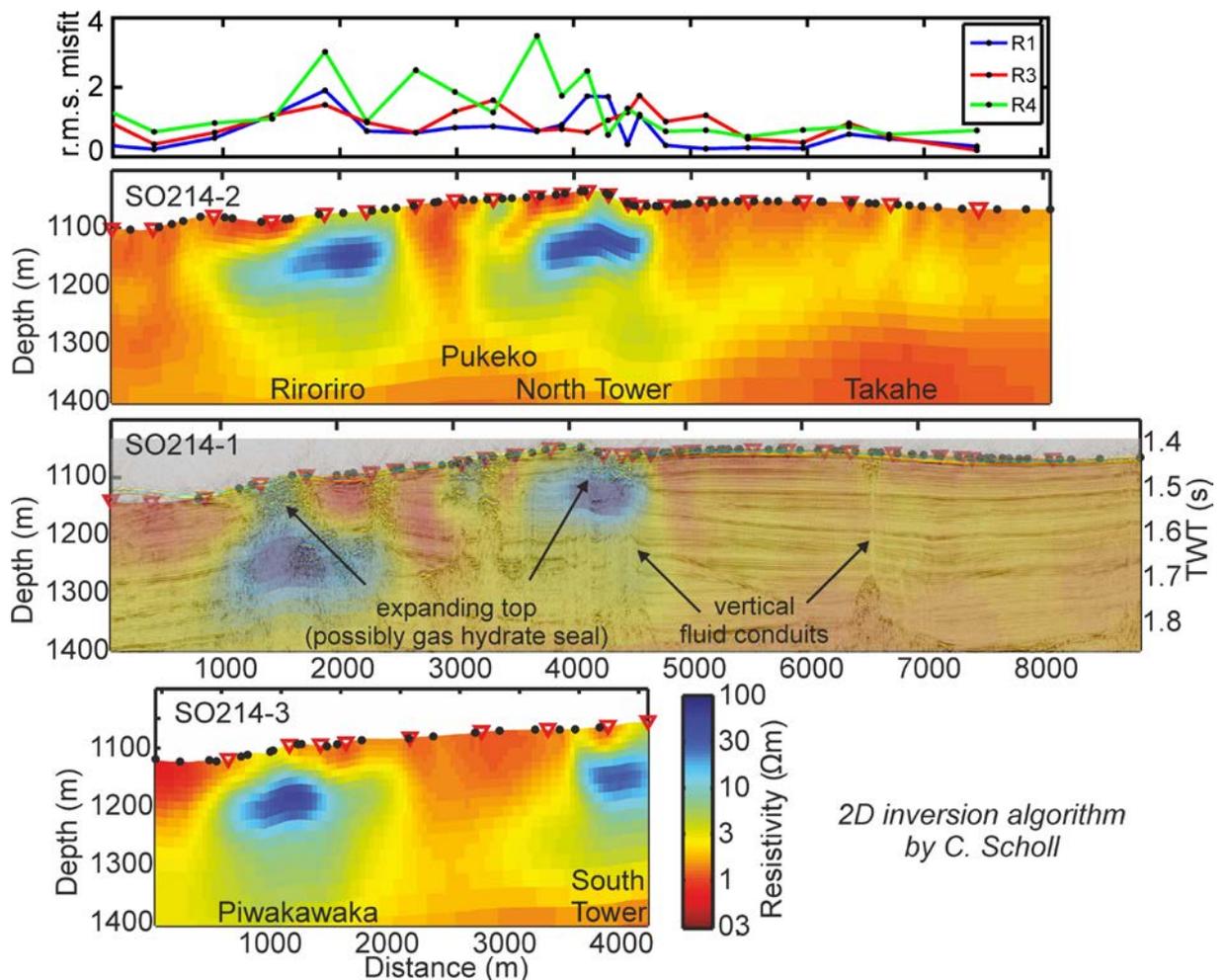


Abb 4: Ergebnisse der 2D Inversion der CSEM Profile von Opuawe Bank. Blaue Bereiche haben extrem hohe Widerstände und korrelieren mit den Methan Seeps und seismisch erfassten Aufstiegszonen. r.m.s.misfit zeigt den Anpassungsfehler für Receiver R1, R3, und R4 für Profil SO214-2 (Seismik-Sektion von S. Koch, Geomar)

## Verwendete Fachliteratur:

- Bialas et al. 2007. FS SONNE Fahrtbericht, SO 291 NEW VENTS. Berichte aus dem Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian Albrechts Universität zu Kiel. Nr. 09 April 2007. ISSN Nr. 1614-6298, 191 pages.
- Bialas et al. 2011. FS SONNE Fahrtbericht, SO 214 NEMESYS. Berichte aus dem Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian Albrechts Universität zu Kiel. Nr. 47 August 2011. ISSN Nr. 1614-6298, 174 pages.
- Darnet, M., Choo, M.C.K., Plessix, R., Rosenquist, M.L., Yip-Cheong, K., Sims, E. & Voon, J.W.K., 2007. Detecting hydrocarbon reservoirs from CSEM data in complex settings: application to deepwater Sabah, Malaysia, *Geophysics*, **72**(2), WA97–WA103.
- Dunbar, J., 2008. Electrical resistivity investigation of gas hydrate distribution in Mississippi Canyon Block 118, Gulf of Mexico, *DOE/NETL Methane Hydrate Projects*.
- Edwards, R.N.: On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using a seafloor transient electric dipole-dipole method", *Geophysics*, **62**, 63-74, 1997.
- Ellis, M., Evans, R., Hutchinson, D., Hart, P., Gardner, J. & Hagen, R., 2008. Electromagnetic surveying of seafloor mounds in the Northern Gulf of Mexico, *Mar. Pet. Geol.*, **25**, 960–968.
- Evans, R.L., 2007. Using CSEM techniques to map the shallow section of seafloor: from coastline to the edges of the continental slope, *Geophysics*, **72**(2), WA105–WA116.
- Goswami, B., et al., 2013: CSEM Survey of a Methane Vent Site, Offshore West Svalbard. In NETL Methane Hydrate Newsletter, Vol. 13 Issue 2, 12-18.
- Goto, T.-N. et al., 2008. A marine deep-towed DC resistivity survey in a methane hydrate area, Japan Sea, *Explor. Geophys.*, **39**, 52–59.
- Key K, Owall J, 2011. A parallel goal-oriented adaptive finite element method for 2.5D electromagnetic modelling. *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05025.x
- Liu X, Flemings PB, 2007. Dynamic multiphase flow model of hydrate formation in marine sediments. *Journal of Geophysical research* Vol. 11 B03101, doi:10.1029/2005JB004227.
- Schwalenberg, K., Willoughby, E., Mir, R., and Edwards, N., 2005, Marine gas hydrate electromagnetic signatures in Cascadia and their correlation with seismic blank zones. *First Break*, 23, 57-63.
- Schwalenberg, K., Haeckel, M., Poort, J., Jegen, M., 2010a. 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*. Vol. 272(1-4), 89-98. doi: 10.1016/j.margeo.2009.10.024
- Schwalenberg, K., Wood, W.T., Pecher, I.A., Hamdan, L.J., Henrys, S.A., Jegen, M.D., Coffin, R.B., 2010b. Preliminary interpretation of electromagnetic, heat flow, seismic, and geochemical data for gas hydrate distribution across the Porangahau Ridge, New Zealand. *Marine Geology*. Vol. 272(1-4), 79-88. doi: 10.1016/j.margeo.2009.07.006.
- Schwalenberg K and Scientific Party of MSM35, 2014., SUGAR Site-CSEM, Maria S. MERIAN Reports, Fahrt MSM35 21.01. – 05.02.2014 Varna, Bulgarien – Istanbul, Türkei. Edited by Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, MARUM, Leitstelle Deutsche Forschungsschiffe. 49 Seiten.
- Weitemeyer, K., and S. Constable, 2010: Mapping shallow geology and gas hydrate with marine CSEM surveys. *First break*, 97-102, June 2010.
- Weitemeyer K and Constable S, 2010. Tests of a new marine EM survey method at Mississippi Canyon 118, Gulf of Mexico. In NETL Methane Hydrate Newsletter, Vol. 10 Issue 01, 13-17.
- Weitemeyer et al., 2011. A marine electromagnetic survey to detect gas hydrate at Hydrate Ridge, Oregon. *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05105.x
- 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.

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

Während der Entwicklungs- und Realisierungsphase der Online – Kommandierung und Datenübertragung bestand ein enger Austausch mit Firma Magson GmbH, Berlin, die die Elektronik für die HYDRA II + III Empfängereinheiten sowie den neuen Signalgenerator entwickelt haben. Firma KUM GmbH in Kiel hat die Druckröhren mit den Steckverbindungen gebaut.

Für die zweidimensionale (2D) Inversion der marinen CSEM-Daten wurde eine Kooperation mit Dr. Carsten Scholl (CGG-EM, Berlin) abgeschlossen, da die Software Firmeneigentum ist. Wissenschaftlicher Austausch fand mit der Arbeitsgruppe von Dr. Jörg Bialas und Stephanie Koch (TP A2 Geomar) zur gemeinsamen Interpretation und Integration der seismischen und hydroakustischen Ergebnisse vor Neuseeland mit den CSEM Ergebnissen aus dem gleichen Messgebiet statt.

Die Ausfahrt auf FS MERIAN (Fahrt MSM35) im Januar 2014 zur Erkundung von Gashydratvorkommen im Donau-Delta, Schwarzes Meer mit mariner CSEM fand mit der Arbeitsgruppe Marine Elektromagnetik am GEOMAR (Dr. Marion Jegen, Dr. Sebastian Hölz) statt.

Diskussionen zur Abschätzung des Gashydratpotentials aus elektrischen Widerstandsdaten wurden mit Dr. Erik Spangenberg und Team (TP B1 GFZ Potsdam) durchgeführt.

## II. Eingehende Darstellung

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

Ziele des SUGAR II Teilvorhabens A2-3 waren auf technischer Seite die Weiterentwicklung des geschleppten CSEM Messsystems HYDRA mit der Option zur Online-Kommandierung und Datenübertragung über das Tiefseekabel. Auf wissenschaftlicher Seite wurden umfangreiche numerische Untersuchungen zur Auflösbarkeit von Gashydrat-Vorkommen anhand von marinen CSEM Daten durchgeführt. Vorhandenes Datenmaterial vom Schwarzen Meer (POS405, 2010, MSM35, 2014), Neuseeland (SO214, 2011) und Nordsee (2012) wurde dazu systematisch mit 1D und 2D Inversionsmethoden ausgewertet.

Durch die Förderung der BGR Teilprojekte in SUGAR I und II steht nun ein für Gashydrate optimiertes CSEM-Messsystem zur Verfügung mit den nötigen Processing-Routinen, 1D, 2D und 3D Modellierungssoftware und erprobten Interpretationsansätzen.

Die vorgegebenen Ziele aus dem Teilprojektantrag sind in Tab. 3 aufgelistet und bewertet.

Tab. 3: Aufzählung der Ziele aus dem Teilprojektantrag mit Beschreibung und Bewertung der erfolgten Arbeiten

TPA2-3: Vorgegebene Ziele aus Teilprojektantrag	Bewertung
Technische Weiterentwicklung des CSEM Systems: Datenübertragung mit Kabelmodem und optischem Modem über das Tiefseekabel	Für die Online-Kommandierung und Datenübertragung zwischen der Receiverkette am Meeresboden über das Tiefseekabel mit dem Schiff wurde eine Lösung mittels SHDSL Modem und Medienkonverter (LWL) gefunden. Dazu wurde eine Kommandierungseinheit (Com-Unit) entwickelt, die mit dem Schiff über den Lichtwellenleiter im Tiefseedraht kommuniziert, und über den koaxialen Leiter, mit Spannung versorgt wird. Es wurden zunächst 2 neue Receiver-Einheiten (HYDRA III) entwickelt, die über ein Ethernet Switch und SHDSL Modem mit der Com-Unit verbunden sind, und Daten mit einer Abtastrate von 10kHz aufzeichnen. Dazu war die Anschaffung von neuen Druckröhren und Zugrahmen erforderlich. Des Weiteren wurde ein neuer Signalgenerator (keine Beschaffung aus SUGARII- Mitteln) erprobt, der wie die Com-Unit im Geräteträger „Pig“ untergebracht ist, und mit dem nun hohe Stromstärken von bis zu 40A (vorher 6-10A, je nach Länge und Spezifikation des Tiefseekabels) gesendet werden können.
CSEM Datenprozessierung, neue Stapelroutinen	Durch die neuen Gerätekomponenten (Signalgenerator, HYDRA II+III) ergaben sich Formatänderungen in den Daten, die in den Auswerterroutinen angepasst wurden. Für die gemeinsame Inversion der CSEM Daten von allen Receivern wurde eine Skalierung der Stappelungsfehler in das Processing eingeführt mit dem Ziel, dass die Daten der jeweiligen Receiver möglichst gleichmäßig im Inversionsprozess gewichtet werden.
Theoretische CSEM	Systematische Vergleichs- und Auflösungsstudien wurden mit synthetischen Modelldaten zu den folgenden Problem

<p>Modellstudien und Inversion</p>	<p>durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflösung und Unterscheidung von Topographie und 3D Untergrundstrukturen.</li> <li>• Vergleich: Flachwasser – tiefes Wasser-Modellierungen (Airwave Problem)</li> <li>• Einfluss vom Datenfehler auf das Inversionsergebnis</li> <li>• Vergleich von Inversionstechniken mit synthetischen und gemessenen Daten: Occam, Marquardt, Global, Bayesian, lateral-constrained, sowie Kombinationen davon.</li> </ul>
<p>1D und 3D Modellstudien bekannter Gashydratlagerstätten</p>	<p>Von der SONNE-Fahrt SO214 standen dem Projekt CSEM Daten von drei Profilen über bekannten Methan-Seeps zur Verfügung. Die Daten sind von sehr guter Qualität und wurden zunächst mit einem 1D Occam Programm invertiert. 2012 wurde eine Kooperation mit Carsten Scholl CGG-EM abgeschlossen zur 2D Inversion der CSEM Profile.</p> <p>Mit der 3D Finite Elemente Software COMSOL sind zunächst Vergleichsrechnungen mit vorhandenen Modellierungsprogrammen durchgeführt worden. Auf Grundlage der 2D Inversionen der Neuseeland-Daten wurden daraufhin systematische 3D Modellrechnungen durchgeführt, um die räumliche Struktur der Methan-Seeps besser zu belegen.</p> <p>Ein neuerer Datensatz ist im Januar 2014 über Gashydratvorkommen in Donaudelta vor Rumänien akquiriert worden. Eine erste Inversion der Daten zeigt sehr hohe Widerstände, die zumindest teilweise auf frischeres Porenwasser zurückgeführt werden können, teilweise aber auch durch eine hohe Gashydratsättigung verursacht sein können.</p>
<p>Modellstudien zur zeitlichen Entwicklung der Gashydratlagerstätte, Monitoring</p>	<p>Bevor aus marinen CSEM Daten eine zeitliche Entwicklungsgeschichte für ein späteres Monitoring abgeleitet werden kann, muss ein genaues Verständnis über die Gashydratsituation im jeweiligen Arbeitsgebiet vorhanden sein. Haben sich Gashydrate in sandigen Sedimenten gebildet oder entlang von Störungszonen, an sogenannten Seeps? Diese Faktoren sind wesentlich für die Abschätzung des Gas/Gashydratpotentials und der möglichen zeitlichen Entwicklung anhand der elektrischen Widerstandsverteilung. Im Rahmen des TP A2-3 wurden Konzepte zur Abschätzung der Gashydratsättigung entwickelt, die auf einer Kombination von Archie's Law und Hashin Shtrikman Grenzen basieren. Für zeitliche Studien sind fest installierte Messinstrumente oder Wiederholungsmessungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen erforderlich. Ein Beispiel dazu ist das CSEM-Experiment welches im Neptune-Canada- Observatorium am Bullseye Node vor Vancouver Island installiert war.</p>
<p>Integration der CSEM Ergebnisse mit Seismik, CSEM (Geomar) und Bohrkerndaten</p>	<p>Im gleichen Messgebiet vor Neuseeland (Opouawe Bank) wurden auch 3D seismische Daten (P-cable) und hydroakustische Daten erhoben, aus denen die Strukturen der Methan-Seeps deutlich hervorgehen. Diese Strukturinformationen sind in die 3D Modellierung mit COMSOL integriert und systematisch modelliert worden. Die seismischen und akustischen Daten zeigen</p>

	subvertikale Strukturen, die sich bis in Meeresbodennähe nachverfolgen lassen, und eine mögliche anisotrope Leitfähigkeitsverteilung vermuten lassen, die sich jedoch nicht mit dem vorhandenen CSEM Datenmaterial auflösen lässt.
Berichte, Publikation	Die Teilergebnisse und Fortschritte im SUGAR II TPA2-3 sind in den Zwischenberichten und auf mehreren nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt worden. Ein Manuskript über die systematische Modellierung von marinen CSEM Daten ist zur Publikation in einer Sonderausgabe von Geophysical Prospecting eingereicht worden. Eine weitere Publikation über die Auswertung der Neuseeland-Daten steht kurz vor der Einreichung in Journal of Geophysical Research. Weitere Publikationen sind über die technischen Details des HYDRA Systems geplant sowie zu den CSEM Daten im Schwarzen Meer (MSM35) in Vorbereitung.

## 2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

*Verwendung der Personalkosten:*

### Wissenschaftliche Mitarbeiterstelle (3 Jahre)

02/2012 – 09/2012 Dr. Martin Engels

02/2013 – 11/2014 Dr. Davood Moghadas

08/2013 – 10/2014 Dr. Dennis Rippe

Dr. Martin Engels war schon in der ersten Phase im SUGAR I TP A2.2 an der BGR angestellt, und hat das HYDRA Messsystem im Wesentlichen mitentwickelt und Auswerteverfahren verfasst und angewendet. Im Anschluss war Herr Engels im NEMESYS Projekt angestellt.

In Phase II des SUGAR TP Projekts hat Herr Engels die 1D Inversion der CSEM Daten vor Neuseeland fortgeführt. Die Anforderungen an die technische Umsetzung der Online-Kommandierung vom HYDRA System hat er von wissenschaftlicher Seite betreut, und Labortestreihen geplant, umgesetzt und ausgewertet.

Dr. Davood Moghadas hat einen wissenschaftlichen Hintergrund in der Anwendung von elektromagnetischen Methoden auf hydrologische Fragestellungen mit Schwerpunkt auf numerischen Modellierungen und Inversionen. Herr Moghadas hat die vorhandenen 1D Inversions- und 3D Modellierungsprogramme in Matlab-Routinen integriert, so dass systematische Modellrechnungen flexibel und bedienerfreundlich durchgeführt und dargestellt werden können. Er hat systematische Auflösungsstudien mit synthetischen und gemessenen CSEM Daten durchgeführt. Dabei hat er die Effekte von Meeresboden-Topographie, 3D versus 1D Untergrundstrukturen, sowie Flachwasser und Tiefwasser untersucht. Für die Inversion von einem CSEM Datensatz aus der deutschen Nordsee hat er verschiedene Inversionsstrategien kombiniert. Ein Manuskript darüber ist bei Geophysical Prospecting eingereicht worden

Dr. Dennis Rippe hat einen wissenschaftlichen Hintergrund in magnetotellurischen Verfahren zu geodynamischen Fragestellungen. Vor der Anstellung im SUGAR II Projekt war er für 6 Monate im NEMESYS Projekt angestellt und hat sich mit der Auswertung der marinen CSEM Daten von Neuseeland beschäftigt. Im SUGAR II Projekt hat Herr Rippe die 3D Modellierung mit COMSOL durchgeführt, eine komplexe Aufgabe, da die Ergebnisse zunächst für einfache Modelle durch Vergleichsrechnungen verifiziert wurden, und dann für jede Senderposition eine neue Diskretisierung durchgeführt wurde.

Für die 2D Inversion der Neuseeland-Daten hat Herr Rippe die Transformation in den Frequenzbereich durchgeführt und Ein- und Ausgabe Parameter abgeleitet und dargestellt.

Für die Auswertung der neuen CSEM Daten über Gashydratvorkommen im Donau-Delta Schwarzes Meer (MERIAN-Fahrt MSM35, 2014) hat er neue Matlab-Routinen zur Prozessierung der Daten verfasst, und erste 1D und 2D Inversionen durchgeführt. Eine Publikation über die Auswertung und Interpretation der Neuseeland-Daten steht kurz vor der Fertigstellung.

Technische Mitarbeiterstelle (18 Monate)

01/2013 – 10/2013 Boris Hahn

Herr Boris Hahn hat vor seiner Einstellung im SUGAR II Projekt als Informationselektroniker für TK- und SAT Anlagen gearbeitet. Im SUGAR II Projekt hat er Lösungen für die Online – Kommandierung und Datenübertragung über das Tiefseekabel auf Modem-Basis entwickelt, Dazu musste eine eigene Kommandierungseinheit (Com-Unit) aufgebaut werden. Das gesamte HYDRA III System mit Deckeinheit, neuem Signalgenerator, Com-Unit und bis zu drei neuen HYDRA III Units mit Online-Kommandierung ist auf der MERIAN-Fahrt MSM35 im Januar 2014 mit seiner technischen Unterstützung zum Einsatz gekommen.

Aufgrund der gut fortgeschrittenen technischen Entwicklungen und nötigen Einarbeitungszeit innerhalb der restlichen Projektlaufzeit ist die Stelle nicht neu ausgeschrieben worden.

*Verwendung der Investitionskosten:*

Die wichtigsten Investitionspositionen mit Bezug auf Titel 05-3022-01-0850 und - 0835 des rechnerischen Verwendungsnachweises sind in Tab. 4 aufgeführt und im Anschluss erläutert.

Tab. 4: Aufzählung der wichtigsten Positionen aus den Titeln 0850 und 0835

Position	Beschreibung	Kosten [€]
1	<u>Modellierung:</u> COMSOL Multiphysics AC/DC Modul	10,704.05 5,349.05
2	<u>Receiver Units mit Online-Kommandierung:</u> Receiver Druckrohre, Stecker, Platinenhalterungen Elektronik-Platinen, Softwareanpassung Modem, Switches, Zubehör Reparatur Receiver Units nach Fahrt MSM35	9,323.65 5,905.00 1,649.23 2,400.00
3	<u>COM-Unit:</u> Druckrohr, Halterungen Modem, Zubehör	10,031.70 1,076.09

	DC/DC Wandler, Zubehör	1,774.63
4	Marine Anschluss- und Verbindungskabel	3,202.18 772.00
5	LWL+Koax Verbindungskabel für Anschluss Seekabel – Com-Unit	5,915.40
6	Softwareentwicklung zur Ansteuerung, Kommandierung, Datentransfer, HYDRA System	19,040.00

Pos 1: COMSOL ist ein kommerzielles Finite Elemente (FE) Programmpaket, mit dem komplexe Untergrundstrukturen dreidimensional modelliert werden können. Für die Berechnung von frequenzabhängigen elektromagnetischen Problemen ist das AC/DC Modul erforderlich. Im SUGAR II Projekt wurde es angewendet, um die räumlichen Struktur der Methan-Seeps vor Neuseeland zu modellieren.

Pos 2: Für die Umsetzung der Online-Kommandierung sind zwei neue Empfängereinheiten (Receiver Units) komplett aufgebaut worden. Die Baugröße der Modems erforderte neue größere Druckrohre und Zugrahmen, sowie neue Elektronikplatinen und Softwareanpassungen.

Pos 3: Die Com-Unit steuert und regelt die Spannungsversorgung (Koaxial) und Kommunikation (Lichtwellenleiter (LWL)) zwischen Schiff und Gerät am Meeresboden über das Tiefseekabel. Es können auch weitere Peripherie-Geräte angeschlossen werden wie CTD-Sensor, Kameras, Licht, Akustik-Transponder, und über das Tiefseekabel angesprochen werden. Damit ist die Com-Unit für verschiedene meeres-technische Geräte anwendbar, und kam z.B. auf der Erprobungsfahrt der neuen SONNE im September 2014 mit CSEM Geräte-Neuentwicklung GOLDEN EYE zum Einsatz.

Pos 4: Für die Anschlüsse zwischen den Gerätekomponenten, und zum Synchronisieren, Kommandieren und Daten auslesen vor und nach dem Einsatz sind spezielle Anschluss- und Verbindungskabel erforderlich.

Pos 5: Für den CSEM Einsatz auf der SONNE Erprobungsfahrt im September 2014 musste ein eigenes Adapterkabel mit GISMA Steckern (Kupfer + LWL) zum Anschluss an die Junction Box (Seekabel nasses Ende) und Com-Unit bereitgestellt werden. Dieses Kabel kann zukünftig auch auf anderen deutschen Forschungsschiffen für CSEM Einsätze verwendet werden.

Pos 6: Die Kommandierungs-Software stellt eine grafische Bedienungsfläche bereit, über die die Eingabe der komplexen Ein- und Ausgabeparameter zur Ansteuerung und zeitlichen Synchronisation der Gerätekomponenten des HYDRA Systems (Signalgenerator, Receiver Units), Anzeige und Protokollierung von Statusmeldungen, sowie die Regelung des Signalgenerators übersichtlich und fehlerfrei erfolgt.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die gerätetechnische Weiterentwicklung des am Meeresboden geschleppten CSEM Systems HYDRA mit der Option zur Online Kommandierung und Datenübertragung über das Seekabel ist erfolgreich umgesetzt worden. Dazu war die Entwicklung und Anschaffung neuer Receiver Units und der Com-Unit erforderlich. Die Funktionalität konnte auf der MERIAN-Fahrt MSM35 im Schwarzen Meer getestet werden. Für die Untersuchung von submarinen Gashydratvorkommen und Sedimenteigenschaften der oberen 300 m vom Meeresboden steht nun ein CSEM Messsystem zur Verfügung, mit dem rauscharme und damit hochqualitative Daten entlang von Kilometer langen Profilen online vermessen werden können.

Die Com-Unit kam auf Ausfahrten auf FS SONNE im südindischen Ozean (INDEX 2013) und auf der Erprobungsfahrt der neuen SONNE mit dem neu entwickelten elektromagnetischen Profiler GOLDEN EYE zum Einsatz.

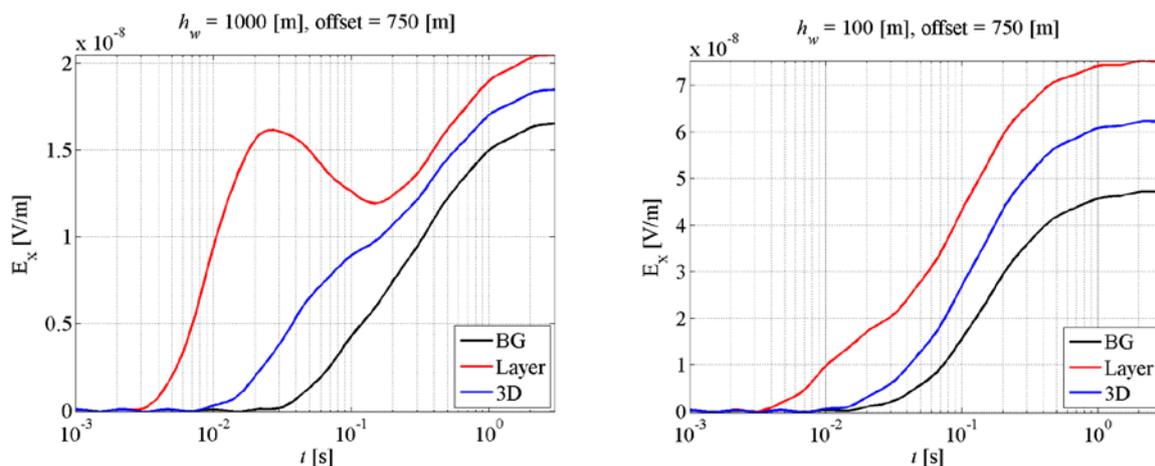


Abb. 5: Step-on Responses des inline-elektrischen Feldes für die Dipol-Dipol Anordnung im Abstand von 750m vom Sendedipol. Links für tiefes Wasser, rechts für flaches Wasser. Die Airwave maskiert hier Untergrundstrukturen, Feldamplituden sind größer und Signalformen verzerrt. BG: Background-Model ohne Anomalie, blau: 3D Anomalie, rot: 1D Schicht.

Für die Auswertung der CSEM Daten mit dem HYDRA System stehen nun Processing Routinen und verschiedene Inversionsmethoden in 1D und 2D (Kooperation mit C. Scholl CGG-EM) zur Verfügung. Durch die 2D Inversion konnten die Ergebnisse der 1D Inversionsrechnungen der Neuseeland-Daten deutlich verbessert werden, insbesondere im Bereich der Methanaustrittsstellen. Die 3D Modellierung der Daten mit COMSOL hat im Wesentlichen die räumliche Ausdehnung und Tiefenlage der anomalen Widerstandsbereiche im Bereich der Methan-Seeps abbilden können.

Systematische Modellrechnungen (Abb. 5) und Inversionen mit Modell- und gemessenen Daten haben zu einem besseren Verständnis zur Auflösbarkeit von Widerstandsverteilungen im Meeresuntergrund geführt, und welche Inversionsmethoden (Occam, Marquardt, Global, Bayesian) unter welchen Voraussetzungen anwendbar sind (Abb. 6).

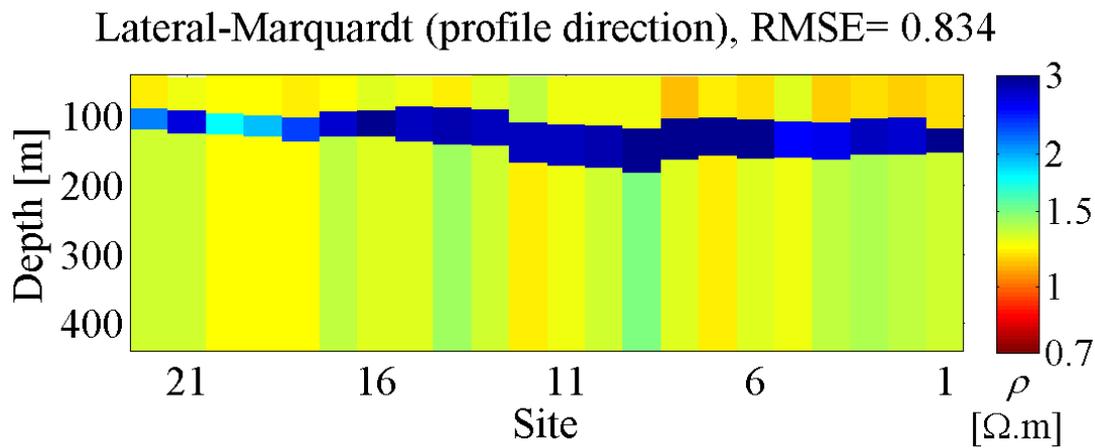


Abb. 6: Zusammengesetzte 1D Marquardt Inversion von einem CSEM Profil aus der Deutschen Nordsee. Marquardt Inversionen sind stark abhängig vom Startmodell. Als Startmodell wurde jeweils das Ergebnis der benachbarten Station (Site) gewählt, woraus sich beginnend mit Station 22 laterale Randbedingungen ergeben. Der schlechte Leiter ist in guter Übereinstimmung mit einer seismischen Amplitudenanomalie.

Die Abschätzung des vorhandenen Gas- und Gashydratpotentials aus der abgeleiteten Widerstandsverteilung kann nicht einheitlich beantwortet werden, sondern hängt stark davon ab, wo und wie sich Gashydrat im Sediment bildet: Porenraum füllend im sandigen Sediment, in Rissen und Störungszonen, fein oder grobverteilt. Die gängige Abschätzung mit Hilfe von Archie's Law kann zwar eine grobe Abschätzung liefern, die Betrachtung von Extremfällen zeigt jedoch, wie groß die Variationen sein können. Um dennoch zu einer Aussage zu gelangen, können realistischere Unter- und Obergrenzen aus der Kombination von Archie's Law und Hashin-Shtrikman Grenzen für bestimmte Situationen abgeleitet werden. Zusatzinformationen aus Seismik, Hydroakustik und Bohrungen helfen, das Gashydratsystem besser zu verstehen. Wichtig anzumerken ist, dass elektromagnetische Verfahren Volumeninformation liefern und sensitiv auf hohe Gas / Gashydratkonzentrationen reagieren, während seismische und hydroakustische Verfahren schon auf geringe Konzentrationen reagieren können. Durch die Kombination dieser Verfahren kann hier eine genauere Beschreibung des Gashydratsystems und eine Abschätzung erfolgen.

Am Beispiel Neuseelands wurde gezeigt, dass die Beurteilung und Quantifizierung des Gashydratpotentials in Neuseeland eine einheitliche Interpretation der vorhandenen CSEM-Daten und den Ergebnissen der seismischen und akustischen Messungen erfordert. Während die seismischen und akustischen Messungen Informationen über die Seep-Strukturen unterhalb der Methan-Austrittsstellen liefern, werden diese durch Volumeninformation der elektrischen Widerstandsverteilung im Meeresboden ergänzt, welche eine Quantifizierung der Gashydrat-Konzentrationen ermöglichen.

Frühere 1D-Inversionen der CSEM-Daten zeigten eine deutliche Korrelation zwischen stark, anomalen elektrischen Widerständen und den von der Seismik und Akustik beobachteten Seep-Strukturen. Gleichzeitig legten vorhandene Artefakte in den Inversions-Modellen sowie die in den seismischen Daten beobachteten Strukturen nahe, dass eine mehrdimensionale Interpretation erforderlich ist, um die Gashydrat-Konzentration im Meeresboden erfolgreich

zu quantifizieren. Im Rahmen der geleisteten Arbeiten wurden daher 2D-Inversionsmodelle berechnet, welche die vorher beobachtete Korrelation zwischen anomalen Widerstandswerten und den Seep-Strukturen bestätigen konnte. Gleichzeitig lieferten die 2D-Inversionsmodelle eine bessere vertikale und laterale Abbildung der Widerstandsverteilung im Meeresboden. Die beobachtete Verteilung und Ausbreitung der anomalen elektrischen Widerstände korreliert dabei sehr gut mit den in der Akustik und Seismik beobachteten Seep-Strukturen. Die 2D-Inversionsmodelle konnten durch zusätzliche 3D-Vorwärtsrechnungen bestätigt werden.

Die Quantifizierung des Gashydratpotentials basiert auf empirischen Gleichungen, deren Parameter vom Sedimentgefüge sowie der Verteilung des Gashydrats im Porenraum des Sediments abhängen. Die Bestimmung der Parameter erfordert Labormessungen von Sediment-Bohrkernen, welche sich in der Praxis jedoch als schwierig erweisen. Am Hikurangi-Margin wurden bislang keine Bohrungen durchgeführt, so dass keine Sediment-Bohrkerne für die labortechnische Untersuchung der Parameter zur Verfügung standen. Es wurden daher systematische Rechnungen durchgeführt, um die minimale und maximale Gashydratkonzentration am Hikurangi-Margin abzuschätzen.

Besondere Bedeutung bei der Abschätzung kam hierbei dem Vorhandensein einer freien Gasphase zu, worauf es Hinweise in den akustischen und seismischen Daten gibt. Anhand der aus den CSEM-Daten bestimmten Widerstandsverteilung im Untergrund lässt sich ohne Zusatzinformationen generell nicht zwischen dem Vorhandensein von Gashydrat und einer freien Gasphase unterscheiden. Es wurden daher theoretische, thermodynamische Modelle der Seep-Bildung herangezogen, welche es ermöglichten, das Verhältnis von Gas/Gashydrat zu Porenfluid abzuschätzen (Abb. 7). Im Bereich der Seeps am Hikurangi Margin ergibt sich dabei für Widerstände von 10 bis 30  $\Omega\text{m}$  eine Sättigung von ca. 57 – 74 % über ein Volumen von ca. 200 m Durchmesser und 50 m Mächtigkeit (siehe blaue anomale Bereiche in Abb. 4), was auf eine mögliche Gashydrat-Lagerstätte hinweist.

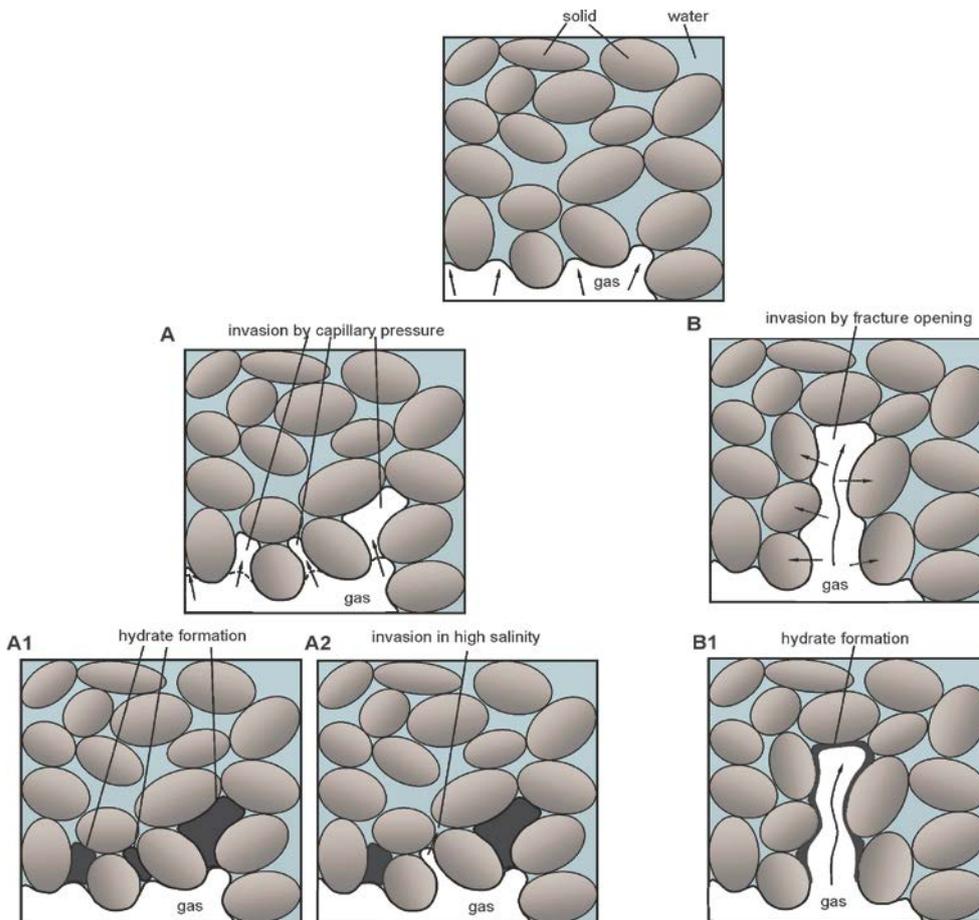


Abb. 7: End-Member Modelle für Gashydratbildung unterhalb von Methan-Austrittsstellen (nach Liu and Flemings , 2007). A: Gas tritt an der BGHS in den Porenraum durch Kapillardruck ein. B: Gaseintritt in den Porenraum entlang von Rissen, Hydrat-Formation um die Gasphase.

#### 4. Verwertungsplan

Mit der Realisierung der Online-Kommandierung und dem Datentransfer über das Tiefseekabel steht nun ein CSEM Messsystem zur Verfügung, mit dem die elektrische Widerstandsverteilung der oberen 200-300m unter dem Meeresboden profilmäßig erfasst werden kann. Dies ist der Tiefenbereich, der für die Gashydraterkundung und nachfolgende Methanproduktion interessant ist. Das HYDRA III Messsystem ist in seiner jetzigen Konfiguration auf der MERIAN-Fahrt MSM35 im Januar 2014 im Schwarzen Meer erprobt worden (Abb. 8). Technische Schwierigkeiten mit neuen Gerätekomponenten (tiefgeschleppter Signalgenerator, HYDRA III Receiver Units) konnten im Verlauf der Ausfahrt behoben werden. Probleme gab es mit undichten und gebrochenen Kabelvergüssen der Empfangsdipole, so dass es zu Datenausfällen kam. Hierfür sollte zukünftig eine andere Lösung gefunden werden.

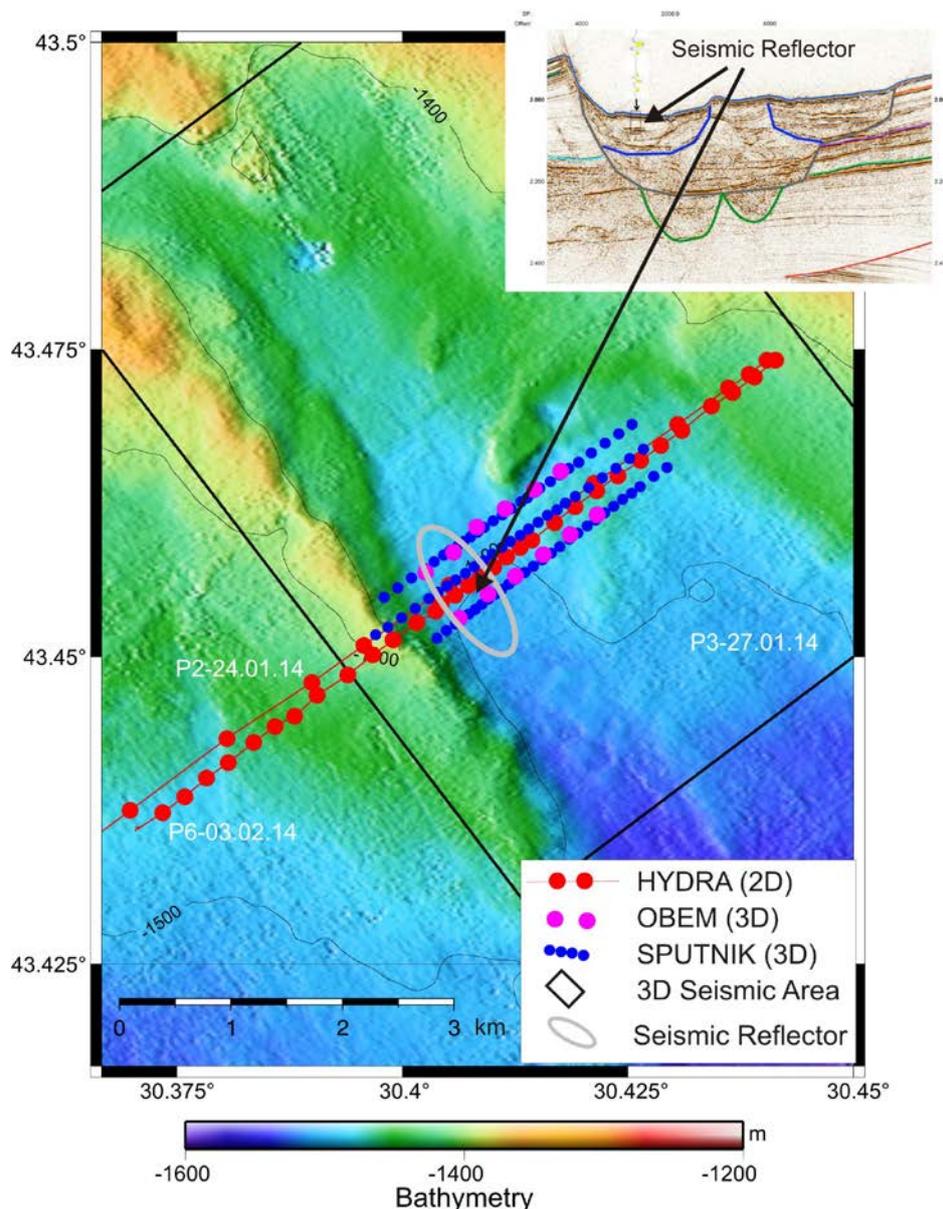


Abb. 8: Seismik und CSEM Arbeitsgebiet 1 im Donaudelta (MERIAN Ausfahrten MSM34 und MSM35). CSEM Daten wurden über eine seismische Amplitudenanomalie gemessen, die auf lokal angereicherte Gashydrate hindeutet.

Für die Datenverarbeitung (Processing) und Inversion stehen für alle Detailschritte Matlab-Routinen für die Ein- und Ausgabe der Modell- und Inversionsrechnungen, zur Positionsbestimmung, und zur Darstellung der Ergebnisse zur Verfügung.

Die Auswertung der CSEM-Messungen am Hikuranki-Margin erlaubt eine Bestimmung der Widerstandsverteilung im Meeresboden unterhalb der beobachteten Methan-Austrittsstellen. Die hierbei erzielten Erfahrungen bilden eine solide Voraussetzung für die Untersuchung von anderen Regionen mit Methan-Austrittsstellen, auf die sich die erarbeiteten Ergebnisse übertragen lassen. Dabei spielt insbesondere die Berücksichtigung einer zusätzlichen freien Gasphase eine wichtige Rolle, um das Gashydratpotential erfolgreich zu quantifizieren. Dieses Vorgehen ist insbesondere für Regionen unerlässlich, in denen keine Sediment-

Proben vorliegen, die eine eindeutige Bestimmung der zur Gashydratquantifizierung genutzten, empirischen Parameter zulassen.

Innerhalb der Projektlaufzeit war die BGR beteiligt an der Antragstellung von 2 Projekten (INGECO, GASINDIA) zur Untersuchung der Gashydratvorkommen im Krishna Godavari-Becken an der Ostküste Indiens. Beide Anträge sind positiv begutachtet, aber nicht bewilligt worden.

In 2013 fanden mehrere Besuche und Gespräche von und mit Prof. Jürgen Mienert (Direktor CAGE Arctic Gashydrat-Center, Uni Tromsø) statt. Zum einen ging es um die Planung einer gemeinsamen Ausfahrt zur Untersuchung der Methan-Seeps und Gashydratvorkommen am Vestnesa Ridge westlich von Spitzbergen mit den marinen CSEM Systemen der BGR. Zum anderen um Kooperationen zwischen Uni Tromsø, NGU und BGR zur Zusammenarbeit und zum Informationsaustausch im Rahmen des BGR Schwerpunktprogramm PANORAMA – Potentialanalyse im Europäischen Nordmeer und angrenzender Arktis. Die Planung für die Ausfahrt zum Vestnesa Ridge ist derzeit zurückgestellt.

Des Weiteren fließt das erworbene Know-how in derzeitige CSEM Geräteentwicklung (GOLDEN EYE) und Auswertungen von marinen CSEM Methoden zur Untersuchung von submarinen polymetallischen Sulfidvorkommen in den deutschen Lizenzgebieten im Indischen Ozean ein.

## **5. Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen**

Seit dem Ende von SUGAR Phase I in 2011 haben verschiedene Gruppen eine Reihe von marinen CSEM Einsätzen zur Erkundung von submarinen Gashydratvorkommen durchgeführt. Eine Übersicht befindet sich in Tab. 2 unter Punkt I.4. Dazu wurden teilweise neue Geräteentwicklungen und Messkonfigurationen eingesetzt:

Die Arbeitsgruppe Marine Elektromagnetik am GEOMAR (M. Jegen, S. Hölz, Partner im SUGAR Projekt) hat eine stationär abgesetzte CSEM Quelle (Sputnik) entwickelt, mit zwei ca. 10m langen, horizontalen Sendedipolen. Die Quelle wird über das Tiefseekabel mit Strom versorgt und entlang von Profilen zwischen stationären OBEM (Ocean Bottom Electromagnetic) Empfängern versetzt. Dadurch ergibt sich ein kleinräumig hochaufgelöster 3D- Datensatz. Die Messkonfiguration wurde vor Norwegen, Taiwan, und im Schwarzen Meer eingesetzt.

Das Marine EMLab am Scripps Oceanographic Institution, La Jolla, CA, ist weltweit führend in der Entwicklung und Anwendung von mariner Elektromagnetik und hat mehrere Expeditionen zur Exploration von Gashydraten durchgeführt (Hydrate Ridge, Weitemeyer et al., 2006, 2011, Golf von Mexiko, Weitemeyer et al., 2010). Die dabei verwendete Messkonfiguration umfasst stationär abgesetzte EM Empfänger und einen ca. 50-100 m über den Meeresboden vom Schiff geschleppten CSEM-Sender mit einem 50-200 m langen

horizontalen Sendedipol. Damit werden größere Eindringtiefen erreicht auf Kosten der Auflösung von kleinräumigen und flachen Strukturen.

Besonders geeignet für die Gashydrat-Fragestellung ist ein neuer vom Scripps entwickelter E-Feld – Sensor (VULCAN), der hinter dem tief-geschleppten CSEM-Sender „geflogen“ wird und drei Komponenten des elektrischen Feldes misst. Mittlerweile werden mehrere VULCANS in Abständen von einigen Hundert Metern hintereinander geschleppt was größere Eindringtiefen und bessere Tiefenauflösung ermöglicht. VULCAN wurde im Golf von Mexico, vor Norwegen, und in Japan eingesetzt.

Ein wesentlicher Vorteil beim HYDRA und beim Vulcan System ist, dass der Sender-Empfängerabstand bekannt ist, und nicht durch aufwändige Positionierung bestimmt werden muss, da der relative Abstand mit der dritten Potenz in die Auswertung eingeht.

An der University of Toronto ist ein neues, ebenfalls am Meeresboden geschlepptes CSEM Messsystem entwickelt worden, das zunächst jedoch nur für den Einsatz im flachen Wasser vorgesehen ist. Die Messkonfiguration gleicht im Wesentlichen dem BGR System. Das System hat eine eigene Winde mit Seekabel für Einsätze bis 300 m Wassertiefe. Für Tiefwasseranwendungen müssten hier Erweiterungen für den Anschluss an das schiffsseitige Tiefseekabel vorgenommen werden.

Datenauswertung und Interpretation.

Die meisten marinen CSEM- Daten werden im Frequenzbereich ausgewertet. Zeit und Frequenzbereich sind theoretisch gleichwertig und über die Fourier-Transformation miteinander verknüpft. Messtechnisch und in der Auswertung ergeben sich Vorteile für verschiedene Anwendungen. Prinzipiell werden in beiden Fällen Zeitreihen mit entsprechender Abtastrate aufgezeichnet. Für tiefer gelegene Zielhorizonte, wie sie für die offshore Öl-und Gasindustrie von Interesse sind, eignen sich Frequenzbereich-Verfahren besser, da die Frequenzwahl für die Zielhorizonte optimiert werden kann. Das HYDRA-System ist für kleinräumige flachere Strukturen bis ca. 300 mbsf (meter below seafloor) geeignet. Für die 1D Auswertung stehen dem Projekt Inversionsverfahren im Frequenz- und Zeitbereich zur Verfügung. Für die 2D Inversion besteht ein Kooperationsvertrag mit CGG-EM. Das Programm MARE2DEM von K. Key (Scripps) ist erst seit September 2014 öffentlich zugänglich und für die Auswertung der HYDRA Daten noch nicht getestet worden.

Joint Inversion Verfahren, die physikalische Parameter aus verschiedenen Datensätzen ableiten und in ein gemeinsames Untergrundmodell integrieren, werden derzeit von verschiedenen Arbeitsgruppen (darunter Geomar, University of Leicester, Schlumberger, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of Utah) entwickelt. Bislang gibt es jedoch kein Beispiel für die Joint Inversion von verschiedenen Methoden zur Evaluierung von Gashydratvorkommen. Strukturelle Informationen aus seismischen Daten können a-priori in der Inversion von CSEM-Daten berücksichtigt werden.

## 6. Publikationsliste zu den bisherigen Entwicklungen und Ergebnisse des SUGAR TP

### A2-3:

#### Konferenzbeiträge:Vorträge/ Poster

- Schwalenberg K., Engels M: HYDRA – A new marine CSEM seafloor system for submarine gas hydrate assessment: first results from the Black Sea and New Zealand. Talk, EMTF Kolloquium, Neustadt, Weinstr., Germany, 26-30 September 2011
- Schwalenberg K, 2011. Geophysical exploration techniques for submarine gas hydrate assessment. Talk at IASS Hearing Workshop: Energy from clathrate hydrates – advances in gas production and CCS. IASS Potsdam 08-09.11.2011
- Schwalenberg K, Engels M, 2012. Marine controlled source electromagnetic gas hydrate assessment: Results from the Hikurangi Margin New Zealand using a new seafloor towed electric dipole-dipole system. Talk at Arctic Frontiers 2012, science section, Tromsø, NO, 25-27 January.2012.
- Schwalenberg, K., Engels, M, 2012. Marine controlled source electromagnetic methods for gas hydrate assessment: Latest results from the Black Sea and the Hikurangi Margin, NZ. 21<sup>st</sup> International EM Induction Workshop, Darwin, Australia, July 25-31, 2012 (oral).
- Schwalenberg, K., Engels, M, 2012. Marine controlled source electromagnetic developments at BGR: New instrumentation, applications and 3D modelling studies. Annual meeting German Geophysical Society (DGG), Hamburg, Germany, 05-08 March 2012 (poster).
- Engels, M, Schwalenberg, K, 2012. Aktive Elektromagnetik bei der Forschungsfahrt SO214 vor Neuseeland: Evaluierung von Gashydraten mit einem neuen geschleppten Multidipolsystem. Annual meeting German Geophysical Society (DGG), Hamburg, Germany, 05-08 March 2012 (oral).
- Gehrmann R, Schwalenberg K, Riedel M, Dosso St, Mir R, Edwards N, 2012. Controlled source electromagnetic study on the response of cold vent sites and gas hydrate occurrences on the northern Cascadia margin. Poster OS43B-1812 at AGU Fall Meeting. San Francisco, USA, 2-7 December 2014.
- Schwalenberg K., Engels M., Scholl C., Schulte i.d. Bäumen H., 2013. Evaluation of seep-related gas hydrate occurrences on Opouawe Bank, Hikurangi Margin. Talk + Poster, Statusseminar Meeresforschung mit FS SONNE. Kiel 14-15 Februar 2013,
- Schwalenberg, K., Engels, M., Mir, R., Scholl, C., Edwards, N. 2013. Two marine CSEM case studies using bottom-towed electric dipole dipole systems. Invited talk at MARELEC 2013, Hamburg 16-19 July 2013.
- Gehrmann R., Dosso St, Schwalenberg, K., Riedel M., N. 2013. 1-D non-linear Bayesian inversion of marine time-domain controlled source electromagnetic data. Poster at MARELEC 2013, Hamburg 16-19 July 2013.
- Schwalenberg K., Engels M. Rippe D., Moghadas D., 2013. Marine CSEM experiments for submarine gas hydrate and free gas exploration: A case study from New Zealand. Talk at Chino-German EM Symposium, Qingdao, China, 31.08-02.09.2013
- Engels M., Schwalenberg K., Mir, R., Gehrmann R., 2013. GPDN – CSEM: A marine CSEM survey in the German North Sea. Talk at EMTF Kolloquium, Kirchhundem - Rohrbach, 23 - 27.September 2013
- Rippe, D., Engels, M., Schwalenberg, K., Scholl, C., 2014. Constraints on gas hydrate distribution on Opouawe Bank on Hikurangi Margin, New Zealand. Poster at 25<sup>th</sup> EMTF Kolloquium, Kirchhundem - Rohrbach, 23-27.September 2013.
- Moghadas, D., Engels, M., Gehrmann, R. A. S., Schwalenberg, K., 2013, 3D numerical modeling and 1D inversion and resolution analysis of time-domain marine controlled source electromagnetic data presented at the 25<sup>th</sup> Schmucker-Weidelt-Kolloquium on deep electromagnetic sounding (EMTF2013), 23-27, September 2013, Kirchhundem - Rohrbach, Germany.
- Schwalenberg K., Engels M., Müller H., 2014. Exploration von marinen Massivsulfiden: Perspektiven für elektromagnetische Methoden. Poster 74. Jahrestagung der DGG, Karlsruhe 10-13. März 2014.

- Rippe, D., Engels, M., Schwalenberg, K., Scholl, C., 2014. Electrical anisotropy associated with methane seep sites - examples from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. Poster at 74. Jahrestagung der DGG, Karlsruhe 10-13. März 2014.
- Moghadas, D., Engels, M., Schwalenberg, K., 2014, 1D Inversion and Interpretation of Time-Domain Marine Controlled Source Electromagnetic (CSEM) data, presented at the 74. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), 10-13 March 2014, Karlsruhe, Germany.
- Schwalenberg K., Engels, M., Rippe D, Scholl C. 2014. Marine CSEM for Gas Hydrate Exploration using a seafloor-towed Multi-Receiver System. Talk at Workshop 9, EAGE, Amsterdam, 16 June 2014.
- Schwalenberg K., Engels, M., Gehrmann R., Moghadas D., Mir R., 2014. Interpretation of marine time domain CSEM data from the German North Sea using different 1D inversion schemes. Poster at 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. Weimar, 24-30 August 2014
- Schwalenberg K., Müller H., Engels, M., 2014. GOLDEN EYE – A new electromagnetic tool for seafloor massive sulfide exploration. Poster at 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. Weimar, 24-30 August 2014
- Rippe, D., Engels, M., Schwalenberg, K., Scholl, C., 2014. Constraints on gas hydrate distribution from marine CSEM on Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. Talk at 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. Weimar, 24-30 August 2014.
- Moghadas, D., Engels, M., Schwalenberg, K., 2014, Systematic multi-dimensional modeling and 1D inversion analysis of time-domain marine controlled source electromagnetic data, presented at 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop, Weimar, Germany, 24 – 30 August 2014.

#### Publikationen, Proceedings, Berichte

- Schwalenberg K, Engels M, 2012. Marine controlled source electromagnetic methods for gas hydrate assessment: new instrumentation and first results from the Black sea test Cruise. Proceedings of the 24<sup>th</sup> Schmucker Weidelt – EMTF Kolloquium. Neustadt an der Weinstr., 19-23 September 2011 p 239 - 249
- Schwalenberg K., Engels M., Schulte i.f.d. Bäumen H., 2013. Evaluation of seep-related gas hydrate occurrences on Opouawe Bank, Hikurangi Margin. Tagungsband Statusseminar Meeresforschung mit FS SONNE. Kiel 14-15 Februar 2013, 209-214
- Rippe, D., Engels, M., Schwalenberg, K., Scholl, C., 2014. Investigations of submarine gas hydrates and methane seep sites on Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. Proceedings of the 25<sup>th</sup> Schmucker Weidelt – EMTF Kolloquium, Kirchhundem - Rohrbach, 23-27. September 2013, pp. 75-85.
- Moghadas, D., Engels, M., Gehrmann, R. A. S., Schwalenberg, K., 2013, 3D numerical modeling and 1D inversion and resolution analysis of time-domain marine controlled source electromagnetic data. Proceedings of the 25<sup>th</sup> Schmucker Weidelt – EMTF Kolloquium, Kirchhundem-Rohrbach, 23-27. September
- Schwalenberg K and Scientific Party of M88/2, 2012. Geopotenzial Deutsche Nordsee (GPDN) - CSEM, METEOR- Berichte. Fahrt M88/2, 08-22 September 2012, Bremerhaven - Bremerhaven. Edited by Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, MARUM, Leitstelle Deutsche Forschungsschiffe. 44 Seiten
- Schwalenberg K and Scientific Party of MSM35, 2014., SUGAR Site-CSEM, Maria S. MERIAN Reports, Fahrt MSM35 21.01. – 05.02.2014 Varna, Bulgarien – Istanbul, Türkei. Edited by Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft, MARUM, Leitstelle Deutsche Forschungsschiffe. 49 Seiten.
- Moghadas, D., Engels, M., Schwalenberg, K., 2014, Systematic 3D forward modeling and 1D joint multi-offset inversion of time domain marine controlled source electromagnetic data, submitted to Geophysical Prospecting November 2014.
- Rippe, D., Engels, M., Schwalenberg, K., Scholl, C., 2015. Constraints on the gas hydrate distribution from marine CSEM on Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand. Manuscript in preparation for Journal of Geophysical Research.

- Gehrmann R., Dettmer J., Schwalenberg K., Engels M, Dosso St., 2015. Trans-dimensional Bayesian inversion of controlled source electromagnetic data in the German North Sea. Manuscript submitted to Geophysical Prospecting.
- Gehrmann R., Schwalenberg K., Riedel M., Dosso St., Spence G., 2015. Bayesian inversion of marine controlled source electromagnetic data offshore Vancouver Island. Manuscript in preparation for Geophysical Journal International.

