

Zweijahresbericht

GeoForschungsZentrum Potsdam
in der Helmholtz-Gemeinschaft

2002/2003

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | III |
| Das System Erde – Forschungsgegenstand des GFZ Potsdam | V |
| Aus der wissenschaftlichen Arbeit | |
| DESERT - Struktur und Dynamik der Dead Sea Transform | 1 |
| Ein Ozean taucht ab: Ergebnisse zur Dynamik des aktiven Kontinentalrandes in Südchile | 19 |
| Lithium-, Bor-, Strontium-, Neodym- und Blei-Isotope als Monitore fluid-induzierter Mineralreaktionen in kontaktmetamorphen Marmoren | 35 |
| Dimensionen und Dynamik des Kohlenstoffkreislaufs in Sedimentbecken | 45 |
| MALLIK - Gashydrate unter Permafrost | 59 |
| Trizonia Island – simultanes Deformations- und Temperaturmonitoring mit faseroptischen Sensoren in einer Rift-Bohrung | 77 |
| Kleine Proben – große Aussagen: Experimente als „Fenster in das Innere der Erde“ | 85 |
| Focused Ion Beam-Technik FIB: eine Nanotechnologie ermöglicht neue Erkenntnisse in den Geowissenschaften | 99 |
| GRACE - Eine Schwerefeld- und Klimamission | 109 |
| Signaturen des Erdmantels im Schwerefeld der Erde | 119 |
| Die Departments | |
| Department 1 „ <i>Geodäsie und Fernerkundung</i> “ | 126 |
| Department 2 „ <i>Physik der Erde</i> “ | 166 |
| Department 3 „ <i>Geodynamik</i> “ | 238 |
| Department 4 „ <i>Chemie der Erde</i> “ | 280 |
| Department 5 „ <i>Geoengineering</i> “ | 332 |
| Gremien des GFZ Potsdam | 361 |
| Organisation, Verwaltung und zentrale Dienste | 362 |
| Personal- und Sozialwesen | |
| Haushalt und Finanzen | |
| Bibliothek des Wissenschaftsparks Albert Einstein | |
| ICDP Operational Support Group | |
| Daten- und Rechenzentrum | |
| Das Jahr der Geowissenschaften 2002 | |
| Auszeichnungen und Ehrungen | 394 |
| Habilitationen, Promotionen | 394 |
| Ausgewählte Publikationen 2002/2003 | 396 |
| Glossar | 406 |

MALLIK - Gashydrate unter Permafrost

Michael Weber, Klaus Bauer, Thomas Wiersberg, Johannes Kulenkampff, Jan Henniges, Kai Mangelsdorf, Ralf Löwner

A general consensus prevails within the international Earth science community on the importance of the investigation of natural gas hydrates. Natural gas hydrates are widespread in certain marine and permafrost settings as well as under continental ice masses. Gas hydrates are solid, ice-like substances containing gaseous methane stored in a cage-like arrangement of water molecules. They are stable only under very limited pressure and temperature conditions and form in regions where the required PT environment exists together with water and hydrocarbon.

During the investigation of gas hydrates, recovered from the seafloor, scientists discovered that up to 164 cubic meters of methane could be recovered from one cubic meter of hydrate. Estimations on the total volume suggest that more than half of the total organic carbon on Earth is trapped in the hydrate accumulations. Apart from the energy potential of these resources, environmental relevant aspects are of considerable significance as methane constitutes a substantially stronger greenhouse gas than CO₂. Furthermore gas hydrates play an essential role in the destabilization of continental margins.

Together with an international consortium of research institutions and oil-producing companies, the GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ) has been involved in the drilling of three research wells in the Mackenzie Delta in northwest Canada since December 2001. Mostly scientists and engineers from the four countries with national research programs on gas hydrate research are currently involved in this research and development project. The main partners are the Japan National Oil Corporation (JNOC), the Geological Survey of Canada (GSC), and the GFZ Potsdam. In addition the US Department of Energy (DoE), the US Geological Survey (USGS), the Indian Ministry of Petroleum and Natural Gas (MPNG) are participating. Through a co-funding by the International Continental Scientific Drilling program ICDP, the project could be opened to interested research groups from all ICDP Member countries so that more than 100 scientists from 30 countries were involved in the Mallik research project.



Abb. 1: Bohrturm in Mallik, Northwestern Territories, Canada, Winter 2001/2002 (Foto: GFZ Potsdam)

Drill rig at Mallik, Northwestern Territories, Canada, Winter 2001/2002.

Der Erforschung natürlicher Gashydrate wird weltweit hohe Bedeutung beigemessen. Natürliche Gashydrate kommen im marinen Bereich, in Permafrostböden und unter kontinentalen Eisschilden vor. Gashydrate sind feste, eisartige Verbindungen, bei denen vorwiegend Methan in ein käfigartiges Gitter von Wassermolekülen eingelagert ist. Sie sind nur in einem sehr engen Druck- und Temperaturbereich stabil und bilden sich unter entsprechenden PT-Bedingungen stets dort, wo Wasser und Kohlenwasserstoffe gemeinsam vorkommen. Bei der Untersuchung von Gashydraten, die vom Meeresgrund gefördert wurden, wurde festgestellt, dass aus einem Kubikmeter Hydrat bis zu 164 Kubikmeter Methan gewonnen werden können. Abschätzungen der Gesamtmengen haben ergeben, dass mehr als die Hälfte des gesamten organischen Kohlenstoffs auf der Erde in Gashydraten gebunden ist. Neben dem Energiepotential dieser Ressource sind aber auch umweltrelevante Aspekte von besonderer Bedeutung, denn Methan ist ein deutlich wirksameres „Treibhausgas“ als beispielsweise CO₂. Außerdem spielen Gashydrate bei der Stabilisierung bzw. Destabilisierung von Kontinentabhängigen wahrscheinlich eine wesentliche Rolle.

Das GeoForschungsZentrum Potsdam hat seit Dezember 2001 zusammen mit einem internationalen Konsortium von maßgeblichen Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen im äußersten Nordwesten Kanadas (Mackenzie Delta) drei Tiefbohrungen zu Forschungszwecken abgeteuft. An diesem FuE-Vorhaben sind vor allem Wissenschaftler und Ingenieure aus den vier Ländern beteiligt, in denen gegenwärtig nationale Gashydrat-Forschungsprogramme gefördert werden. Hauptpartner sind die Japan National Oil Corporation (JNOC), der Geological Survey of Canada (GSC) und das GFZ Potsdam. Darüber hinaus sind das US Department of Energy (DoE), der US Geological Survey (USGS) und das India Ministry of Petroleum and Natural Gas beteiligt. Durch eine Ko-Finanzierung des International Continental Scientific Drilling Program ICDP konnte eine breite Öffnung des FuE-Programms für Arbeitsgruppen aus allen ICDP-Mitgliedsländern sichergestellt werden, so dass über 100 Wissenschaftler/innen aus über 30 Ländern an diesem Forschungsprojekt teilnehmen.

Die Hauptgründe, Gashydrate im Permafrost am Ort Mallik (Abb. 1, 2) in-situ zu untersuchen, sind folgende:

- Mallik ist eines der konzentriertesten Gashydratvorkommen der Welt (z.T. über 80% Porenfüllung mit Gashydraten)
- In Mallik existiert ein über 150 m dickes Gashydrat-Paket
- Es gibt umfangreiche Ingenieur-, Geologie- und Geophysik-Vorkenntnisse aufgrund früherer Untersuchungen in Mallik
- Mallik ist eine kosteneffektive Onshore-Lokation Geologie und Reservoir-Bedingungen sind den Offshore-Lagerstätten ähnlich.

Die Geologie des Mackenzie-Deltas ist durch oberflächennahe, jüngere deltaisiche Sedimente und ältere im wesentlichen fluviatile und glaziale Ablagerungsräume charakterisiert. In größeren Teufen finden sich Mesozoische und Känozoische deltaisiche Sandsteine, die Gesamtmächtigkeiten von bis zu 12 km erreichen können. Diese Sequenzen enthalten organisch reiche Schiefer und Kohlelagen, welche als Muttergesteine für die Bildung von Kohlenwasserstoffen in diesem Gebiet diskutiert werden. Der überwiegend terrigene Charakter dieser Sedimente zeigt eine hohe Gashöflichkeit des Gebietes an, für dessen Genese allerdings Teufen von über 6000 m im Mallik-Gebiet vermutet werden. Wichtig für die Migration und Verteilung z. B. von Gas und Gashydraten sind regional unterschiedliche Hebungsphasen, welche im Mallik-Gebiet die Kenozoischen Sedimente bis zu 1000 m angehoben haben sollen, bzw. zu signifikanten Erosionsphänomenen geführt haben können.

Die Auffindung von Erölreservoirs lässt auch auf ein hohes Erdölpotential der organisch reichen Lagen schließen. Aus diesen Gründen ist das Mackenzie-Delta mit dem Mallik-Gebiet trotz der schwierigen klimatischen Bedingungen momentan auch eines der attraktivsten Explorationsgebiete für konventionelle Energieträger in Nordamerika.

Die Schlüsselfragen, die in diesem Projekt untersucht werden, sind:

- Die geologischen, geophysikalischen, geochemischen und geomechanischen Eigenschaften von Gashydraten im Permafrost (in-situ und im Labor)
- Stabilität und Reaktionskinetik von Gashydraten bei Änderungen der Temperatur, des Drucks und der Chemie
- Die Stabilität kontinentaler Gashydrate bei Klimaänderungen (kurzfristige Änderungen und Langzeit-Monitoring).

Am 25. Dezember 2001 begann das Mallik-Experiment mit der ersten von drei Bohrungen (Abb. 1, Abb. 3 links) am nord-östlichen Rand der Northwestern Territories, Canada, nahe eines Drill-Sites, an dem 1972 bereits im Rahmen einer klassischen Explorationsbohrung Gashydrate erbohrt wurden. Neben der Bohrung 5L, in der die thermische Stimulation stattfand, wurden zum ersten Mal auch 2 Beobachtungsbohrungen (3L und 4L) in jeweils ca. 45 m Entfernung bis ungefähr 1200 m Tiefe niedergebracht (siehe Abb. 3, links), um geophysikalische Untersuchungen zu ermöglichen. Ein weiterer wichtiger Aspekt war die nahezu vollständige Probenahme des gesamten Gashydratintervalls. Einige Beispiele der hierbei gewonnenen Kerne sind in Abb. 3 (rechts) gegeben. In den folgenden Abschnitten werden nun einige Ergebnisse der vom GFZ Potsdam durchgeführten Studien dargestellt.

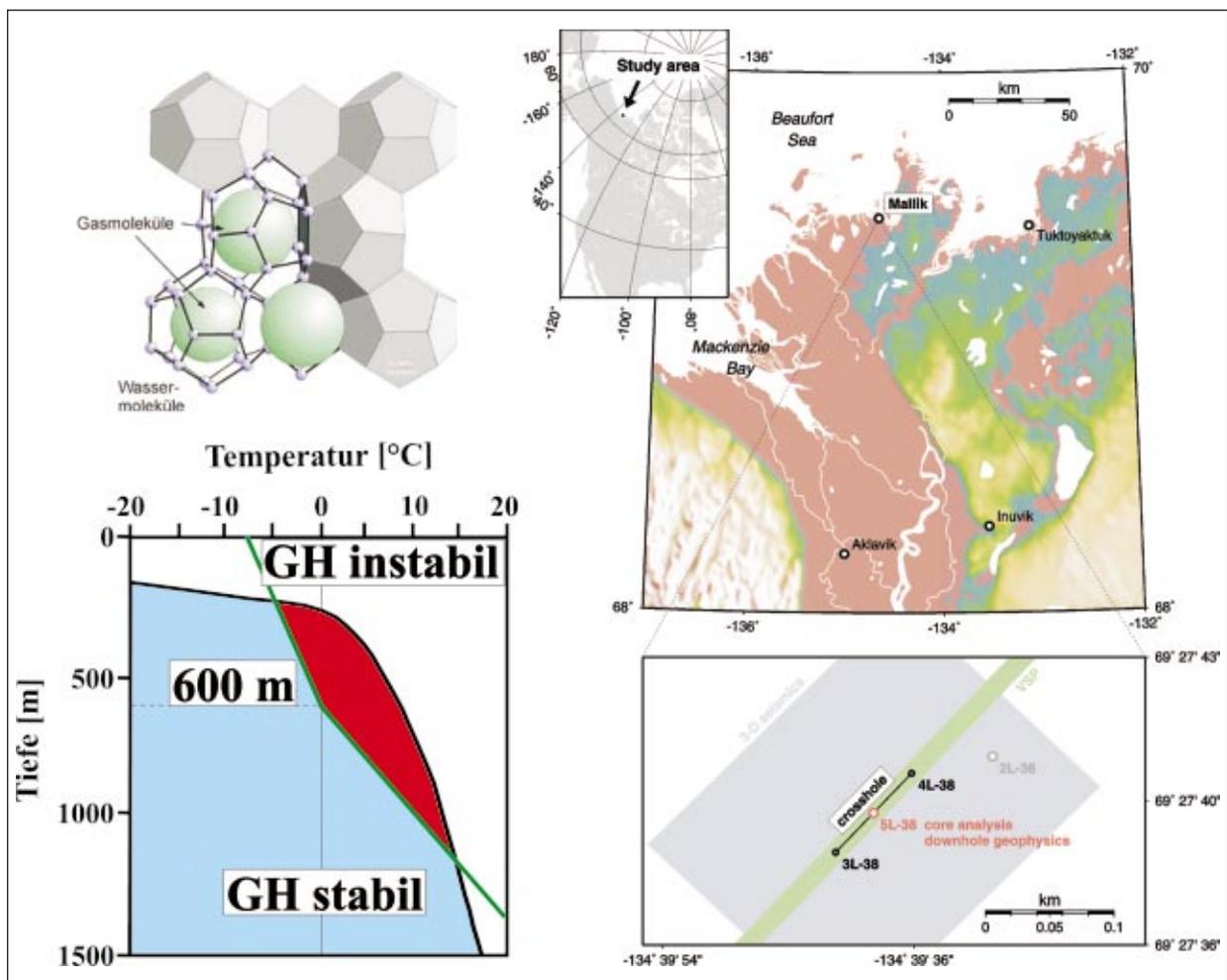


Abb. 2: (Links oben) Schematische Darstellung der Gashydratstruktur I (Geomar). (Links unten) Stabilitätsbereich von Gashydraten im Permafrost als Funktion von Tiefe/Druck und Temperatur (blauer Bereich). In Mallik reicht der Permafrost bis in 600 m Tiefe, Die grüne Kurve ist die Geotherme in Mallik. Die rote Region ist der sich hieraus ergebende Stabilitätsbereich für das Vorkommen in Mallik. (Rechts) Karte des Untersuchungsgebietes in den Northwestern Territories, Canada. Die von den vier seismischen Experimenten (3D-Seismik, Vertical Seismic Profiling (VSP), Cross-hole Tomographie und Down-hole Seismik) überdeckten Gebiete sind ebenfalls gegeben.

(Left top) Schematic presentation of the Structure I of gas hydrates. (Geomar). (Left bottom) Stability field of gas hydrates in permafrost as a function of depth (pressure) and temperature (blue area). In Mallik the permafrost reaches to a depth of 600 m and the green Line is the geotherm, the red area is the resulting stability field for this site. (Right) Map of study area in the Northwestern Territories, Canada. The area covered by the 4 seismic experiments (3D seismics, vertical seismic profiling (VSP), cross-hole tomography and down-hole seismics) are also given.

Crosshole-Seismik

Während der Feldkampagne Mallik 2002 konnte zum ersten Mal ein cross-hole-seismisches Experiment innerhalb eines Gashydratvorkommens, d.h. die Durchschallung des Untersuchungsgebietes zwischen zwei benachbarten Bohrlöchern, durchgeführt werden. Diese Untersuchungen sind durch zwei Hauptfragestellungen motiviert. Zum ersten soll die Strukturierung der Gashydratzone vor Beginn der Stimulationstests im Auflösungsbereich der Cross-hole-Seismik (einige Meter) abgebildet werden. Zusammen mit Oberflächen-seismik, VSP, Bohrloch-Sonic und seismischen Messungen an Kernproben wird damit eine umfassende Datenbasis zur Charakterisierung von Gashydraten bereitgestellt. Zum zweiten untersuchen wir die Eignung

von cross-hole-seismischen Verfahren zur Erkennung und gegebenenfalls zur räumlich-zeitlichen Kartierung von Dissoziationsprozessen, Zersetzung des Gashydrates in Wasser und Gas, als Reaktion auf eine thermische Stimulation in der Gashydratzone. Dabei dienen die Resultate aus den zuerst genannten Untersuchungen als Referenzinformation.

Die Messungen erfolgten zwischen den jeweils 45 m von der Hauptbohrung entfernten Beobachtungsbohrungen 3L und 4L in Tiefen zwischen 800 und 1150 m (Abb. 3), wobei piezokeramische Vibratorquellen im Quell-Bohrloch sowie Hydrophonaufnehmer im Empfänger-Bohrloch zum Einsatz kamen. Durch diese Konfiguration wurden sowohl die Gashydratzone selbst (etwa ein

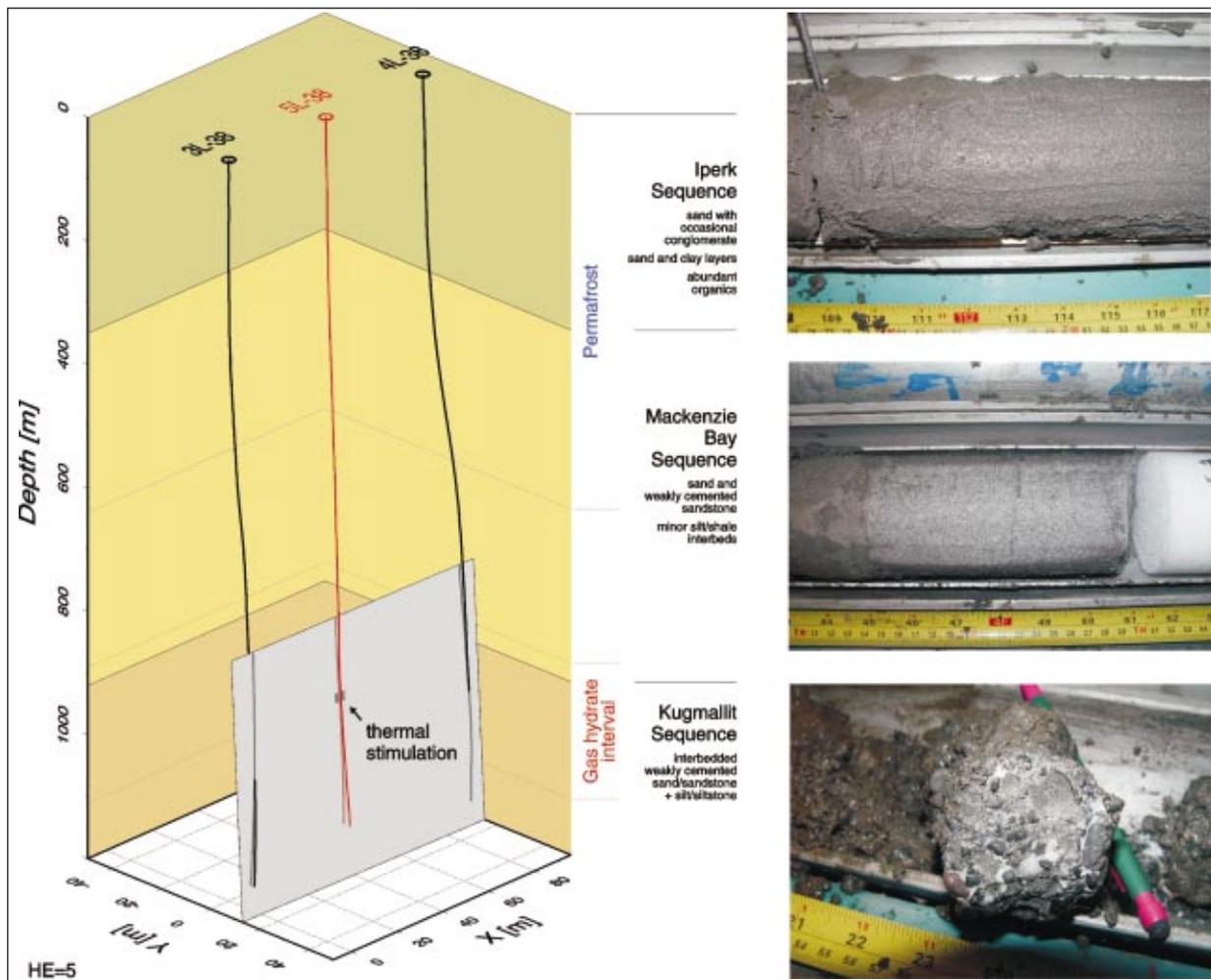


Abb. 3: (Links) 3D-Darstellung der Lage der drei Bohrlöcher (3L, 4L, 5L) mit den wichtigsten stratigrafischen Sequenzen. Der Tiefenbereich, der durch cross-hole Tomografie überdeckt wird, ist durch die graue Fläche angegeben. Der 20 m Tiefenbereich der thermischen Stimulation in 4L ist ebenfalls gegeben. Vertikale Überhöhung 5:1. (Rechts) Typische Bohrkern aus dem gekerntem Tiefenbereich von 885 bis 1150 m Tiefe. (Oben) Kern direkt nach Entnahme, noch mit Drill-Muds bedeckt. (Mitte) Kern mit Gashydraten in Sand und Silt nach Entfernung des Drill-Muds mit weißem Abstandshalter (rechts). (Unten) Kern mit Gashydraten (weißes Porenfüllung) in kiesigem Konglomerat.

(Left) Perspective view showing the 3D location of the three boreholes (3L, 4L, 5L) and the major stratigraphic sequences. Vertical exaggeration is 5:1. The depth range of the cross-hole tomography is the gray area. The 20 m range of the thermal stimulation in 4L is also indicated. (Right) Typical cores from the depth range between 885 and 1150 m (Top) Core directly after recovery still covered with drill mud. (Middle) Core with gas hydrates in sand and silt after removal of drill-mud. (Bottom) Core with gas hydrates (white pore filling) in conglomerates.

Tiefenintervall von 900 bis 1100 m) als auch die unmittelbar angrenzenden Sedimentschichten, einschließlich potentiell zu erwartender Gasreservoirs unterhalb der stabilen Hydrate, seismisch durchstrahlt. Der zentrale Bereich des Überdeckungsschemas erfasste die thermischen Stimulationsexperimente in der Hauptbohrung 5L. Um die Effekte der Hydratzersetzung studieren zu können, wurden neben einer Referenzmessung drei Wiederholungsexperimente nach der thermischen Stimulation durch heißes Wasser durchgeführt (Abb. 4). Die schematischen Durchstrahlungsdiagramme zeigen die jeweils überdeckten Regionen an. Während bei der Referenzmessung das gesamte Untersuchungsintervall durchstrahlt wurde, konzentrierten sich die Wiederholungsmessungen auf das Niveau des Stimulationsexperimentes.

Zuerst wurden die Daten aus den Referenzmessungen ausgewertet, um die notwendigen Hintergrundmodelle für das seismische Monitoring bereitzustellen. Insbesondere konnten tomografische Modelle der P-Wellengeschwindigkeit sowie der Dämpfung ($100/Q$) abgeleitet werden. Abb.5a zeigt einen Teil der dafür verwendeten Daten. Die aus den horizontalen Strahlwegen abgeleiteten Laufzeiten und spektralen Parameter liefern bei Annahme ausschließlich vertikaler Variation für Geschwindigkeit und Dämpfung 1D-Modelle, die sehr gut mit den in der Hauptbohrung aus seismischen Logs gemessenen Werten übereinstimmen (Abb. 5b und 5d).

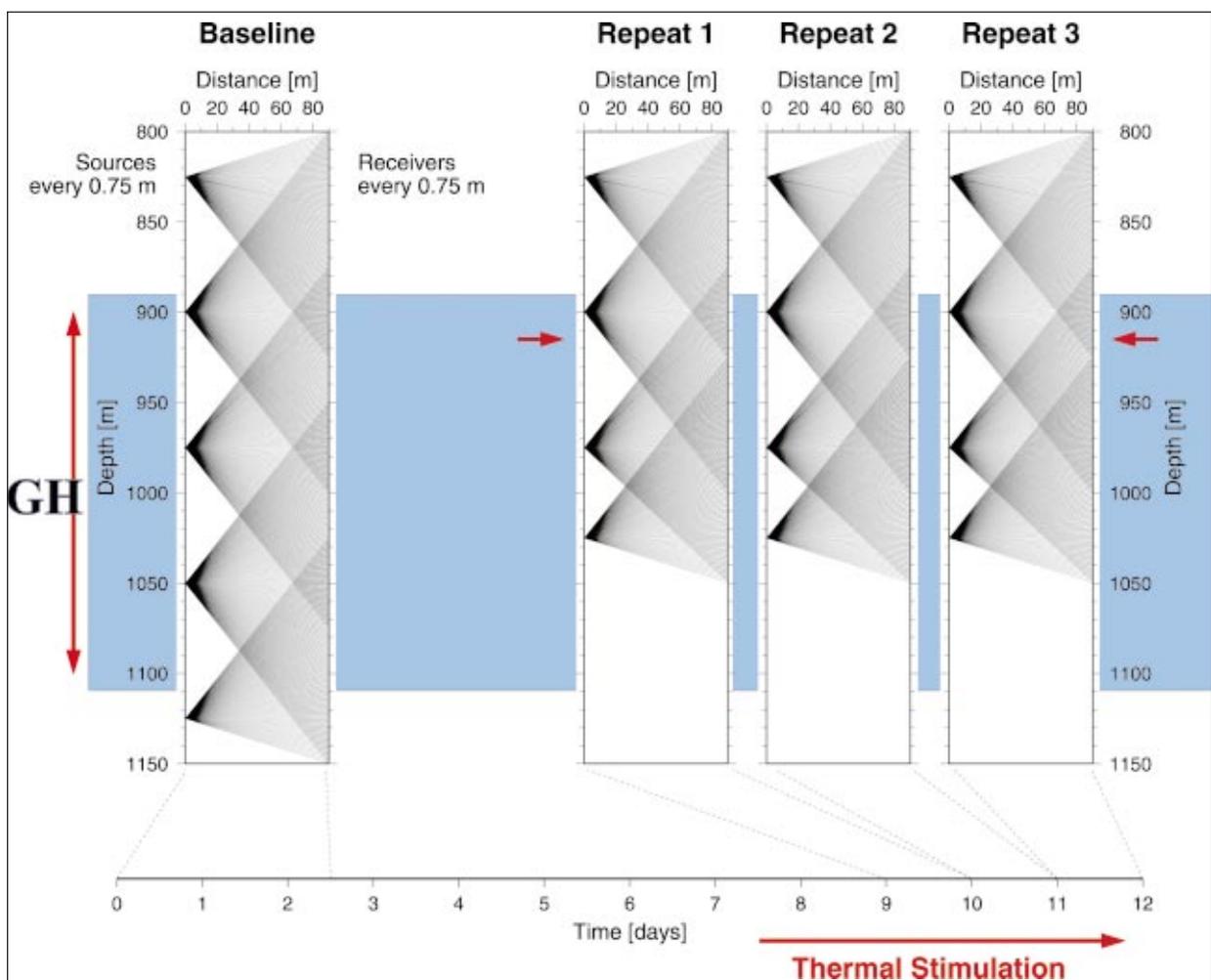


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der cross-hole-seismischen Referenzmessung sowie der drei Wiederholungsmessungen zur Detektion von Gashydratzersetzung als Reaktion auf thermische Stimulation (rote Pfeile bei 920 m). Die Darstellung zeigt nur wenige, repräsentative Quell-Lokationen (z.B. nur 5 von insgesamt 480 Quell-Lokationen während der Referenzmessungen). Der Tiefenbereich mit Gashydraten (GH) ist in Blau hinterlegt.

A schedule illustrating the timing of the four cross-hole surveys and the spatial ray-coverage of each survey. Note that rays are shown for only a few representative source locations (e.g., 5 out of 480 shots during the baseline survey). The depth range of gas hydrates (GH) is indicated in blue.

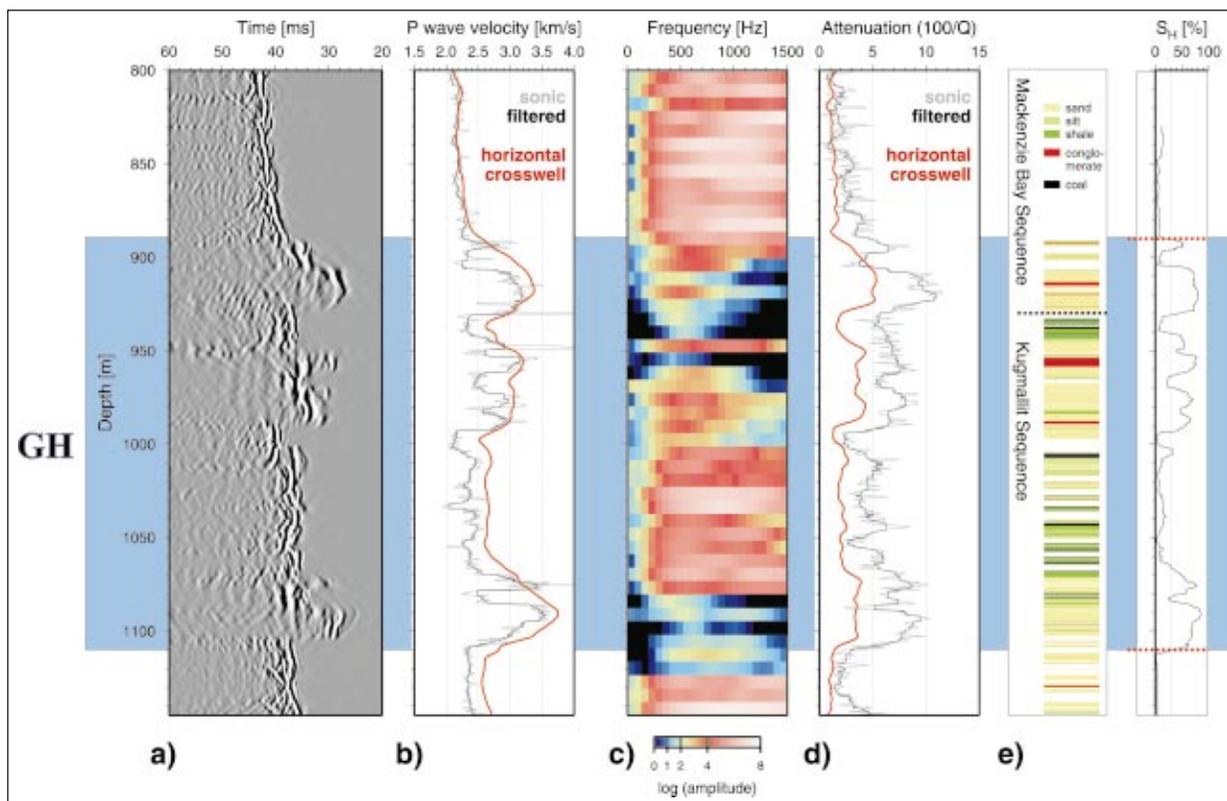


Abb. 5: **a)** Seismogramm-Montage für einen Teil der Daten aus der ersten Wiederholungsmessung. Gezeigt sind ausschließlich die ca. 500 Spuren mit gleicher Quell- und Empfängertiefe. **b)** 1D-Modell für die vertikale P-Wellengeschwindigkeitsverteilung abgeleitet aus den in (a) gezeigten Daten, sowie der Vergleich mit den seismischen Log Resultaten in der Hauptbohrung. **c)** Logarithmische Darstellung der Spektralampplituden für die in (a) gezeigten Daten. **d)** 1-D-Modell für die vertikale Dämpfungsverteilung. **e)** Lithologisches Profile aus Kerndaten; sowie aus NMR und Porosität geschätzte Gashydratsättigung. Der Tiefenbereich mit Gashydraten (GH) ist in Blau hinterlegt.

a) Vertical zero-offset gather, representing the roughly 500 traces of the repeat 1 survey with the same source and receiver depth. **b)** 1D P-wave velocities estimated from the data together with sonic P-wave velocities. **c)** Logarithmic presentation of the spectral amplitudes calculated from the wavefield around the first arrivals in (a). **d)** 1-D attenuation estimated from the data shown in (a). **e)** Lithologic profile from coring, and gas hydrate saturation estimated from difference of density and NMR porosity at 5L. The depth range of gas hydrates (GH) is indicated in blue.

Für die 2D-Modellierung wurden zunächst Inversionsverfahren für isotrope Medien verwendet. In Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Pratt (Queen's University, Kingston, Kanada) konnten die Resultate durch Tomogramme für anisotrope Medien erweitert werden (Bauer et al., 2004). Die in Abb. 6 dargestellten tomografischen Schnitte zeigen erneut eine sehr gute Übereinstimmung sowohl mit den seismischen Logs als auch mit der Lithostratigrafie in der Hauptbohrung 5L (Abb. 5e). Die zweidimensionale Erweiterung der Bohrlochdaten durch die Tomografie verdeutlicht die vorwiegend geschichtete Strukturierung im Untersuchungsgebiet. Allerdings werden auch laterale Variationen insbesondere

in der Gashydratzone erkennbar. Gashydrat-gesättigte Bereiche zeigen erhöhte P-Wellengeschwindigkeiten und wirken stark dämpfend im Vergleich zu den ungestörten Sedimenten. Diese unerwarteten Effekte deuten möglicherweise auf eine besondere Mikrostrukturierung der gashydrat-führenden Sedimente, die durch weiterführende petrophysikalische Untersuchungen (siehe Kulenkampf et al. (2004); Petro-physikalische Laboruntersuchungen) verifiziert werden können. Unterhalb der Gashydrate werden keinerlei Anzeichen für freies Gas beobachtet (normale Geschwindigkeiten, normale Dämpfungswerte).

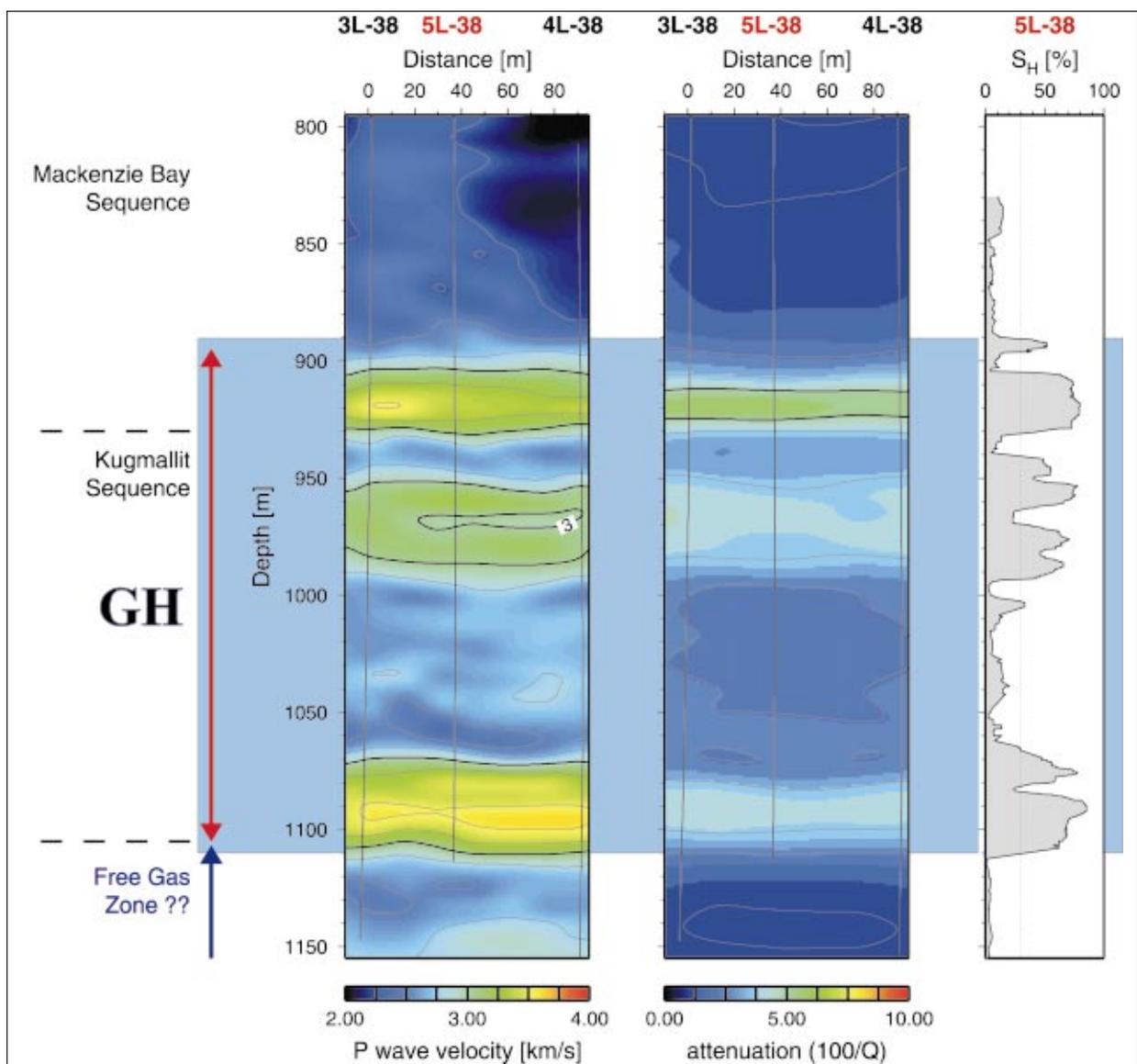


Abb. 6: Tomografische Schnitte für die P-Wellen-Geschwindigkeit sowie für die Dämpfung zwischen den beiden Beobachtungsbohrungen 3L und 4L, abgeleitet aus cross-hole-seismischen Daten. Vereinfachte Lithostratigraphie (links) sowie aus NMR und Porosität geschätzte Gashydratsättigung (rechts). Der Tiefenbereich mit Gashydraten (GH) ist in Blau hinterlegt.

Final tomographic models for P wave velocity and attenuation between boreholes 3L and 4L, derived from inversion of cross-hole seismic data. Simplified litho-stratigraphy (left) and gas hydrate saturation (right) as estimated from difference of density and NMR porosity at 5L. The depth range of gas hydrates (GH) is indicated in blue.

Die Untersuchungen zur P-Wellen-Geschwindigkeits-anisotropie ergaben im gesamten Tiefenintervall (800 bis 1150 m) um 10 bis 20 % erhöhte horizontale Geschwindigkeiten gegenüber den vertikalen Geschwindigkeitswerten. Ein solches Verhalten wird häufig in vorwiegend sählig abgelagerten, fein geschichteten Sedimenten beobachtet. Die Kenntnis der Schichtanisotropie ist besonders wichtig, wenn Resultate aus verschiedenen seismischen Experimenten mit jeweils unterschiedlicher Beobachtungsrichtung (z.B. Bohrlochseismik-Messungen – hauptsächlich vertikal - und Cross-hole-Tomographie – hauptsächlich horizontal) miteinander verglichen werden. Im Rahmen der Untersuchungen zum seismischen Monitoring des thermischen Stimulationsexperiments wurden Modellrechnungen durchgeführt, um die zu

erwartenden Effekte in den Daten vorhersagen zu können. Auf Grund der geringen Mengen an freigesetztem Gas sind nur sehr geringe Veränderungen in den Monitor-daten zu erwarten. Bei Anwendung von herkömmlichen Auswerteverfahren liegen diese unterhalb der Nachweisgrenze. Dies ist der Grund, weshalb im weiteren versucht werden wird, Phasenverschiebungen der ersten P-Welle für eine Wellenform-Tomographie auszunutzen. Die zersetzte Zone soll dabei durch Differenzbildung der einzelnen Wellenform-Tomogramme detektiert werden. Als alternativen Ansatz versuchen wir, die an der Dissoziationszone gestreuten und konvertierten Wellen zurückzuverfolgen, wobei Methoden der Wellenfeldseparation sowie bildgebende Verfahren entwickelt werden.

Charakterisierung der Paläo-Umwelt mit organisch-geochemischen Methoden

Das vielfältige Leben auf der Erde hinterlässt seine molekularen Spuren in den Sedimenten. Viele dieser molekularen Überreste ehemaligen Lebens erlauben daher Rückschlüsse auf vergangene Umwelt- und Ablagerungsbedingungen. Im Rahmen des Mallik-Projektes wurde das organische Material der Bohrung mit unterschiedlichen organisch-geochemischen Methoden untersucht, um die Änderungen der Paläo-Umwelt im Mackenzie River-Delta zu charakterisieren.

Bereits die verschiedenen lithologischen Abfolgen von Tonstein, Siltstein, Sandstein und organisch-reichen lignitischen Lagen mit variablen Kohlenstoffgehalten von 0,04 % in den Sandsteinlagen bis zu 46 % in den Ligniten lässt auf signifikante Änderungen des Sedimentationsgeschehens in diesem Gebiet schließen. Die Rock-Eval-Pyrolyse des Probenmaterials zeigt, dass es sich bei dem Probenmaterial überwiegend um unreifes organisches Material aus terrestrischen Quellen handelt (Typ III Kerogen, Abb. 7a). Dies wird durch mikroskopische (Abb. 7b) und molekulare Untersuchungen der Mallik-Proben bestätigt. Die Lipidmuster werden deutlich von Markern dominiert, deren Zusammensetzung auf terrestrisch-deltaische Sedimentablagerungen hindeuten. Lipide, wie α - und β -Amyrin, repräsentieren einen terrigenen Eintrag von Bedecktsamern (Angiospermen), aber auch Nacktsamer (Gymnospermen) wie Koniferen (Abb. 7b) trugen zum organischen Material der Bohrung bei. Interessanterweise deuten die Lipidverteilungen in den organisch-reichen lignitischen Lagen auf eine Bildung dieser Ablagerungen in sumpfigem Milieu hin (n-Alkan-Maximum bei n-C₂₃, charakteristisch für Sphagnum sp. (Moos)), während die organisch-armen Sedimente eher das terrestrische Hintergrundsignal von deltaischen Flusssedimenten repräsentieren. Derartige

Änderungen der Ablagerungsbedingungen sind nicht untypisch für Flussdeltazonen, in denen es häufig zu Verlagerungen der Flussarme kommt.

Neben den terrestrischen Lipiden tritt eine Reihe mikrobieller Biomarker auf, die bis in Tiefen von über 1000 m nachgewiesen werden konnten, wobei einige der mikrobiellen Lipide (Phospholipide) auf die Existenz einer „Tiefen Biosphäre“ im Bereich der Mallik-Bohrung hindeuten (siehe hierzu Teil Department 4: „Suche nach Spuren mikrobiellen Lebens“).

Gas-Geochemie Untersuchungen online und im Labor

Innerhalb des Mallik-Projekts wurden beim Abteufen der Bohrungen Mallik 4L und Mallik 5L aus der zirkulierenden Bohrspülung Gase extrahiert und online analysiert. Weitere online Gasuntersuchungen erfolgten während eines thermischen Produktionstests in Mallik 5L. Aus der Bohrspülung extrahierte Gase liefern Informationen zur Gaszusammensetzung und Gas-Tiefenverteilung; die Untersuchungen während des thermischen Produktionstests zeigen z. B. Heterogenitäten innerhalb des stimulierten Horizonts an.

Beim Bohren wird die zirkulierende Bohrspülung mechanisch in einem Separator entgast, der oberhalb des Spülungszuflusses zum Schütteltisch installiert ist (Abb. 8, links). Das Gas wird durch geringen Unterdruck und Rotation eines Propellers aus der Bohrspülung extrahiert und über eine Teflonleitung in einen Messcontainer gepumpt, wo es mit einem Massenspektrometer, einem Gaschromatographen und einem Radon-Detektor analysiert wird (Abb. 8, rechts). Zwischen Gasfreisetzung und Analyse vergehen lediglich wenige Minuten, so dass erste Ergebnisse nahezu in Echtzeit vorliegen.

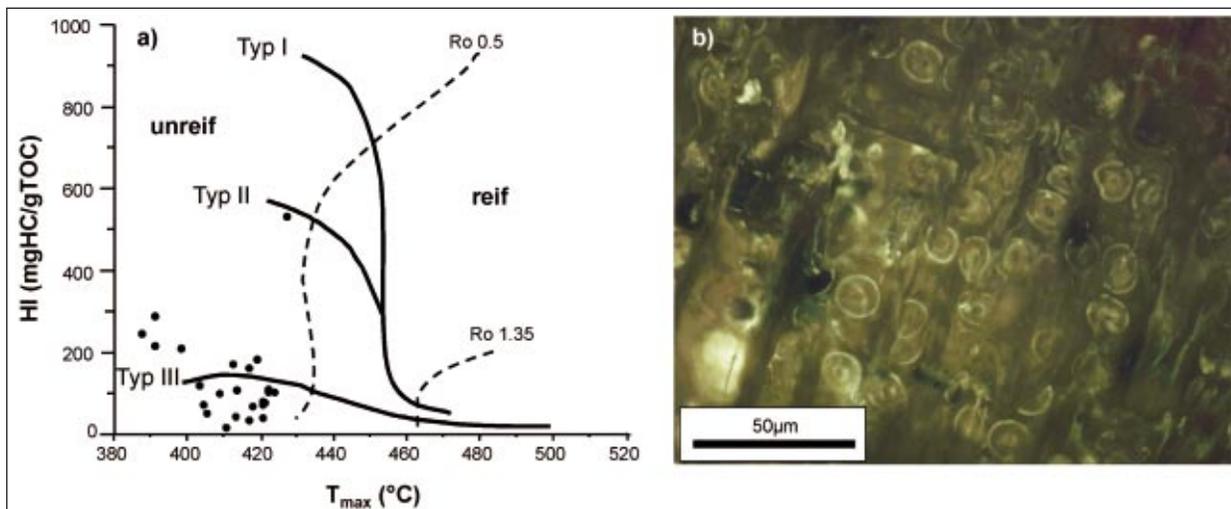


Abb. 7: (a) Das HI (Wasserstoff-Index)- T_{max} -Diagramm weist dem überwiegenden Teil der Mallikproben (schwarze Punkte) einen unreifen terrestrischen (Typ III Kerogen) Charakter zu (R_o = Vitrinitreflexion). (b) Die mikroskopische Aufnahme im Fluoreszenzlicht zeigt Strukturen von Koniferenhölzern.

(a) HI vs T_{max} cross plot indicating a predominantly immature and terrigenous character of the Mallik sample material (R_o = vitrinite reflectance). (b) Microscopic picture in fluorescence light showing woody materials of conifers.



Abb. 8: (Links) Entgaser zur mechanischen Freisetzung der Gase aus der Bohrspülung. (Rechts) Messcontainer mit Analysegeräten: Massenspektrometer (links oben), Gaschromatograph (rechts oben) und Radon-Detektor (links unten) (Foto: T. Wiersberg, GFZ).

(Left) Degasser to release gas mechanically from the circulating drill mud. (Right): Laboratory trailer with gas-analytical equipment: mass spectrometer (left top), gas chromatograph (right top), and radon detector (right bottom)

Online Gasuntersuchungen während der im Winter 2001/2002 durchgeführten Bohrkampagne in Mallik dienten dazu, Gashydratvorkommen bereits während des Bohrens zu diagnostizieren und von Gasen anderer Herkunft zu unterscheiden. Weiterhin liefert die Bestimmung der Gaszusammensetzung erste Informationen über die Herkunft der Gase. Für eine eindeutige Aussage sind zusätzliche Isotopenuntersuchungen notwendig; daher wurden vor Ort Gasproben genommen und später auf Edelgas- und Kohlenstoffisotope im Labor untersucht.

Die Zusammensetzung der Bohrspülungsgase zeigt neben Methan (CH_4) als Hauptbestandteil auch geringe Anteile an höheren Kohlenwasserstoffen. Zusätzlich treten in einigen Horizonten erhöhte Konzentrationen an Helium und/oder Radon auf. Die im Sediment eingelagerten gashydratführenden Horizonte weisen im Vergleich zum umgebenden Sediment neben hohen Konzentrationen an Methan geringere Konzentrationen an höheren Kohlenwasserstoffen und Helium auf. Dies zeigte sich schon beim Bohren durch gashydratführende Horizonte und konnte später durch Untersuchungen an hydratführenden Sedimentkernen bestätigt werden. Anhand dieser Parameter konnten insgesamt über zehn gashydratführende Horizonte unterschieden und von anderen Fluidzutritten, die zum Teil auch hohe Methankonzentrationen aufweisen (~770 m), abgegrenzt werden (Abb. 9). Hohe Methankonzentrationen in der Bohrspülung allein sind daher kein zwingender Hinweis auf Gashydratvorkommen.

Die im Vergleich zum umgebenden Sediment geringeren Konzentrationen höherer Kohlenwasserstoffe in Hydraten wird als „dry-out“-Effekt beschrieben (Lorenson et al. 1999) und ist wahrscheinlich mit einer Kohlenwasserstoff-Fraktionierung während der Hydratbildung zu erklären. Verringerte Heliumgehalte in gashydratführenden Schichten sind auf die geringe Größe des Heliumatoms zurückzuführen; das Heliumatom ist unter den gegebenen Bedingungen zu klein, um ein Hydratgitter zu stabilisieren. Dies konnte später durch Laboruntersuchungen der Edelgaszusammensetzung auch für Neon bestätigt werden, erst die schweren Edelgase Argon, Krypton und Xenon scheinen unter den gegebenen Bedingungen Gashydrate zu bilden.

Die Zusammensetzung der Gase des thermischen Produktionstests zeigt Schwankungen innerhalb von Stunden in den Gehalten an Kohlendioxid, Helium und höheren Kohlenwasserstoffen. Die Variationen im Kohlendioxidgehalt korrelieren positiv mit Temperaturschwankungen der zirkulierenden Sole (Abb. 10) und können mit der guten und temperaturabhängigen Löslichkeit von Kohlendioxid in wässrigen Lösungen erklärt werden. Die Löslichkeiten der übrigen Gase sind unter den gegebenen Bedingungen von Druck, Temperatur und Salinität sehr gering, ihre Konzentrationen zeigen daher keine Abhängigkeit von der Temperatur.

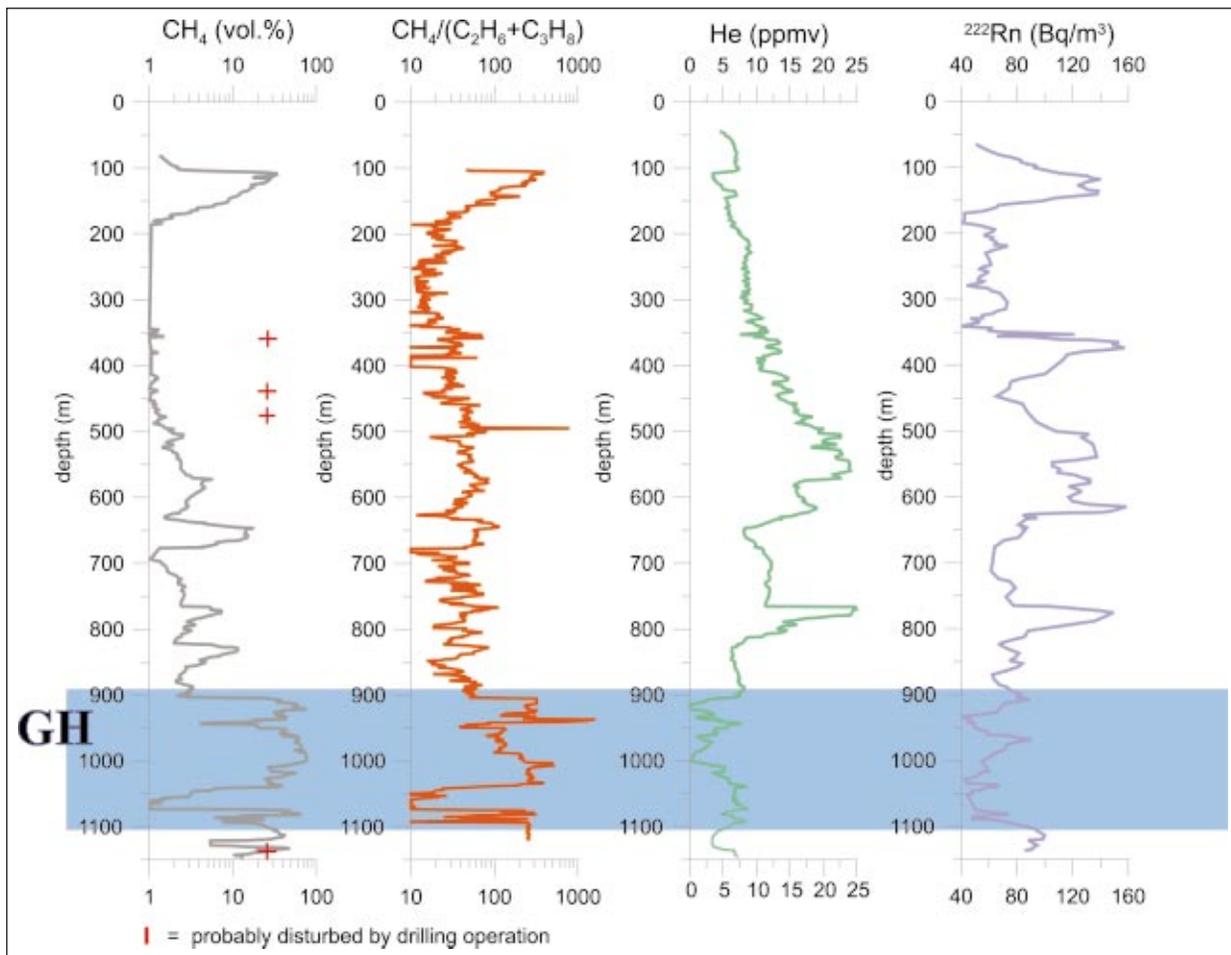


Abb. 9: Gas-Tiefenprofile der Bohrung Mallik 4L. Gashydrate zeigen erhöhte Methan-Konzentrationen, ein erhöhtes $CH_4/(C_2H_6+C_3H_8)$ Verhältnis sowie verringerte Helium-Konzentrationen.

Gas depth profiles for Mallik 4L well. Gas hydrates are characterized by high methane concentrations, enhanced $CH_4/(C_2H_6+C_3H_8)$ ratios, and low helium concentrations.

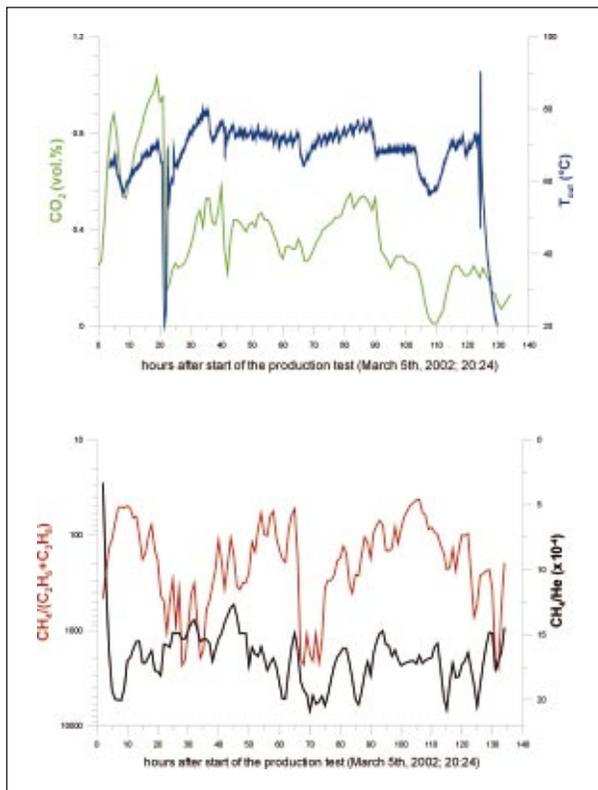


Abb. 10: (Oben) Temperatur der zirkulierenden Sole (blau) und Kohlendioxid-Gehalt der extrahierten Gasphase (grün) während des thermischen Produktionstests (ca. 120 Stunden). Schwankungen in der Kohlendioxid-Konzentration korrelieren mit der Temperatur des zirkulierenden Fluids. (Unten) Während des thermischen Produktionstests korrelieren Schwankungen im $CH_4/(C_2H_6+C_3H_8)$ Verhältnis (rot) direkt mit Schwankungen der Helium-Konzentration (blau).

(Top) Temperature of the circulating brine (blue) and CO_2 concentration in the released gas (green) during the thermal production test at Mallik 5L. A positive correlation between the variations in both parameters is indicated. (Bottom) Variations between the $CH_4/(C_2H_6+C_3H_8)$ ratio (red) and the helium content in the gas phase (blue) released during the thermal production test correlate directly.

Die Schwankungen im Gehalt von Helium und höheren Kohlenwasserstoffen korrelieren direkt miteinander (Abb. 10). Eine solche Korrelation wurde bereits in hydratführenden Schichten von Mallik 4L und 5L beobachtet und kann auf eine inhomogene Gaszusammensetzung entlang des stimulierten Horizonts (907 bis 920 m) zurückgeführt werden. Laterale Heterogenitäten in der Gaszusammensetzung des getesteten Horizonts sind als Ursache für die Schwankungen weniger wahrscheinlich, denn die während des Produktionstests freigesetzte Gasmenge ermöglicht zusammen mit der Hydratsättigung und des Porenvolumens der hydratführenden Sedimente dieser Tiefe eine Abschätzung des stimulierten Sedimentvolumens. Es ergibt sich ein mittlerer Radius im Dezimeter-Bereich für das Zylindervolumen, aus dem Hydrate um den perforierten Abschnitt des Bohrlochs thermisch zersetzt wurden.

Petro-physikalische Laboruntersuchungen

Die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften gashydrathaltiger Sedimente ist grundlegend für die Quantifizierung der globalen Gashydratvorkommen und für das Verständnis von Bildungs- und Zersetzungsprozessen. Aus diesem Grund wurden im Feldlabor in Inuvik gesteinsphysikalische Untersuchungen unter simulierten in-situ Bedingungen an natürlichen gashydrathaltigen Sedimentproben vorgenommen, die in Mallik 5L gewonnen wurden. Neben dieser Messkampagne, die natürlich vorkommenden gashydrathaltigen Sedimenten galt, werden derzeit die Bildungs- und Zersetzungsprozesse sowie die hiermit einhergehenden Änderungen gesteinsphysikalischer Eigenschaften unter möglichst realistischen Bedingungen, allerdings an Hand eines künstlichen Korngerüsts, in Langzeitexperimenten untersucht.

Das „Field Laboratory Experimental Core Analysis System“ (FLECAS, Abb. 11) wurde in Inuvik nahe der Bohrung installiert. Es war das Ziel der Untersuchungen, aus der Bohrung gewonnene Kerne mit möglichst geringfügigen Alterationen wieder unter die in-situ herrschenden Druck und Temperaturbedingungen zu bringen und dabei den elektrischen Widerstand, die elastischen Eigenschaften, die Fluidsättigung und die Korngerüsteigenschaften zu bestimmen. Hierzu wurden die Bohrkerne sofort nach der Gewinnung bei arktischen Umgebungstemperaturen (ca. -30 °C) in Transportbehältern eingebracht und mit einem Methandruck von 5 MPa beaufschlagt. Vor der Untersuchung wurden die tiefgefrorenen Proben äußerst schonend präpariert und anschließend in den ebenfalls tiefgekühlten Autoklav eingebaut. Dort wurden zunächst die in-situ herrschenden Druckbedingungen eingestellt (etwa 20 MPa lithostatischer Druck auf das Korngerüst, etwa 10 MPa hydrostatischer Stickstoff-Gasdruck im Porenraum) und dann die Temperatur erhöht bis auf den in-situ herrschenden Wert (Temperaturbereich 8 bis 14 °C). Der exakte Temperaturwert konnte aus den kontinuierlichen Temperaturmessungen (DTS-Messungen, siehe nächstes Kapitel) in den Bohrlöchern abgeleitet werden.



Abb. 11: FLECAS („Field Laboratory Experimental Core Analysis System“) im Inuvik Research Institute, Kanada. Im Vordergrund: Geräte für die Probenpräparation und Transportgefäße (Foto: H. Kulenkampf, GFZ).

FLECAS („Field Laboratory Experimental Core Analysis System“) mounted in the Inuvik Research Institute, Canada. In the foreground: tools for sample preparation and pressure vessels for sample storage.

Nach Erfassung der gesteinsphysikalischen Parameter bei in-situ Bedingungen wurde durch Entlastung des Porendrucks die Zersetzung des Hydrats veranlasst, was aufgrund der endothermen Reaktion zu einer deutlichen Temperaturabnahme auf der Probenoberfläche führte (Abb. 12).

Es zeigte sich, dass die deutlichste Veränderung der gesteinsphysikalischen Eigenschaften während der Temperaturzunahme nicht durch die Zersetzung des Methanhydrats bewirkt wird, sondern durch das Auftauen der tiefgefrorenen Probe. Beim Auftauen nehmen die Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten und der elektrische Widerstand – wie zu erwarten – deutlich ab, außerdem nimmt die Dämpfung der seismischen Ultraschallwellen sehr stark zu. Während der Hydratzersetzung ist die Dämpfungsabnahme sowohl der Kompressionswellen als auch der Scherwellen noch am deutlichsten ausgeprägt, ungewöhnlicherweise ohne klare Zunahme der Schallgeschwindigkeiten.

Diese Untersuchungsergebnisse lassen sich bereits weitreichend interpretieren: Die starke Dämpfung ist vermutlich der wichtigste beobachtbare Effekt bei Gashydraten. Möglicherweise geht sie auf mikroskopische Strömungen und Gaseinschlüsse in den gewöhnlich mikroporösen Hydratstrukturen zurück. Aufgrund der sonst nur geringen Änderungen der übrigen Parameter bildet das Gashydrat keinesfalls eine Art Zement zwischen den Körnern, sondern tritt als Füllung vorwiegend der großen Poren auf. In Einklang damit steht, dass hydratführende Zonen im Verlauf der Bohrung vorwiegend in den grobkörnigsten Sedimenten (mittlere Korngröße ca. $500\text{ }\mu\text{m}$) vorkommen.

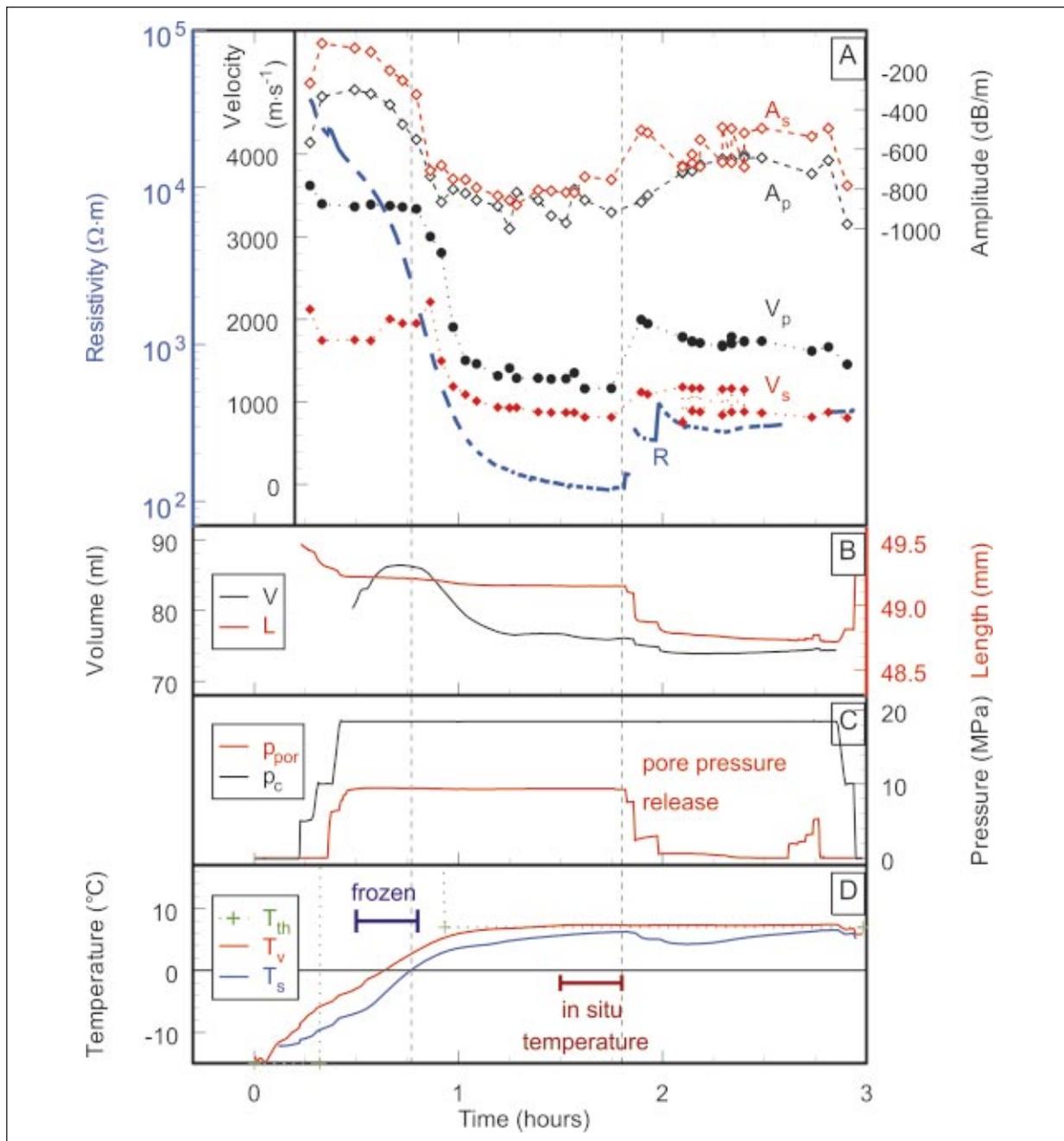


Abb. 12: Zeitlicher Ablauf der Untersuchung. Der Zeitpunkt des Erreichens der Temperatur von 0°C und des Auslösens der Hydratzersetzung durch Entlastung des Porendrucks sind jeweils durch die gestrichelten Linien markiert. (A) Spezifischer elektrischer Widerstand R (blau), P -Wellengeschwindigkeit V_p (schwarz), Scherwellengeschwindigkeit V_s (rot), Amplituden der Kompressionswellen (A_p) (offene rote Symbole) und der Scherwellen (A_s) (offene schwarze Symbole) (bezogen auf einen Aluminium-Standardkörper). (B) Volumen V und Länge L der Probe, (C) Porendruck p_{por} und lithostatischer Druck p_c (D) Temperatur im Thermostat T_{th} , im Druckgefäß T_v und an der Probenoberfläche T_s .

Measurement record. Vertical lines drawn at 0°C and at pore pressure release initiating gas hydrate dissociation. (A) Resistivity R (blue), compressional wave velocity V_p (black), shear wave velocity V_s (red), amplitudes of compressional waves (A_p) (open red symbols), and shear waves (A_s) (open black symbols; referred to an aluminum standard). (B) Sample length and volume. (C) Pore pressure p_{por} and confining pressure p_c . (D) Temperature in the thermostat T_{th} in the vessel T_v and at the sample surface T_s .

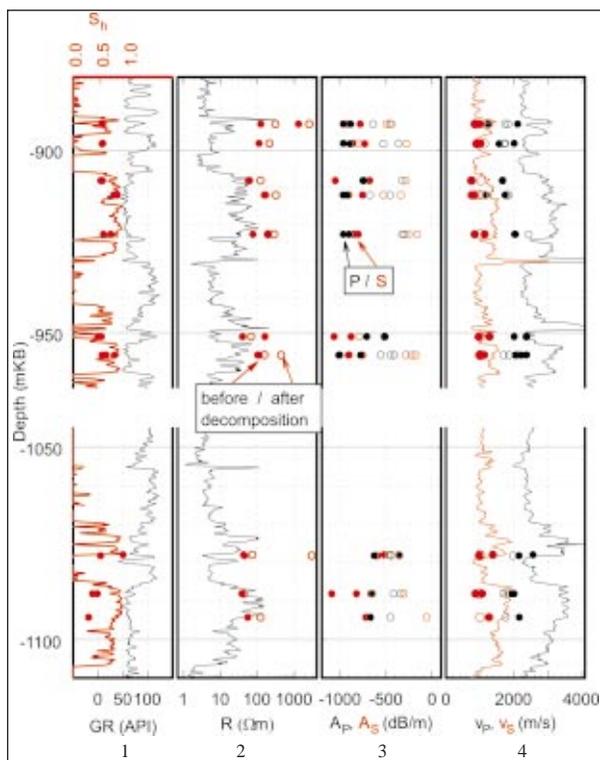


Abb. 13: Zusammenfassung der Messergebnisse bei in-situ Bedingungen (volle Symbole) und nach der Gashydratzerersetzung (offene Symbole), Vergleich mit Bohrlochmessungen (Linien). Von links nach rechts (1) Gammalog (schwarze Linie), Gashydratsättigung S_h aus Labormessungen (rote Punkte) im Vergleich zur Gashydratsättigung, die aus dem NMR-Log abgeleitet wurde (rote Linie). (2) Spezifischer Widerstand der Proben (rote Punkte) im Vergleich zum Formationswiderstand R_T , der aus den elektrischen Bohrlochmessungen (Array Induction Tool) berechnet wurde. (3) Kompressions- und Scherwellenamplituden der Proben, bezogen auf einen Aluminiumstandardkörper (schwarz: Kompressionswellen, rot: Scherwellen). (4) Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeit der Proben (Punkte) und vom Soniclog (Linien).

Physical parameters at in-situ conditions (filled symbols) and after gas hydrate decomposition (open symbols), comparison to logging results (lines). From left to right: (1) Gamma ray (GR) (black line), laboratory gas hydrate saturation S_h (red dots) compared to S_h derived from the Combinable Magnetic Resonance Tool (CMR) (red line). (2) Resistivity R of the samples (red dots) compared to true formation resistivity R_T from the processed Array Induction Tool (AIT). (3) P- and S- wave amplitudes of the samples related to an aluminum standard sample (black dots: P, red dots: S). (4) P- and S- wave velocities of the samples (black dots: P, red dots: S) and from the Dipole Shear Sonic Imager Tool (DSI) (black line: P, red line: S).

Obwohl davon auszugehen ist, dass sich die Bohrkern während ihrer Gewinnung verändert haben, sind die gewonnenen Messdaten in bisher einmaliger Form repräsentativ für gashydrathaltige Sedimente unter in-situ-Bedingungen (Abb. 13). Mit ihrer Hilfe ist die Entwicklung physikalischer Gashydrat-Modelle möglich, und ermöglicht somit die physikalisch fundierte quantitative Behandlung terrestrischer Gashydrat-Lagerstätten.

Faser-optisches Temperaturmonitoring

Sowohl das Ausmaß und die Verbreitung natürlicher Methanhydratvorkommen, als auch die Freisetzung von gasförmigem Methan beim Zerfall der Methanhydrate, werden maßgeblich von den unterirdischen Druck- und Temperaturbedingungen bestimmt. Zur Untersuchung des Temperaturfeldes und des daraus abzuleitenden Stabilitätsbereichs von Methanhydrat standen im Mallik-Gebiet bislang jedoch nur Einzelmessungen von Explorationsbohrungen zur Verfügung. Das Ziel der hier durchgeführten Temperaturmessungen ist es daher, eine detaillierte Datenbasis für die Erkundung des geothermischen Feldes im Bereich der Mallik-Methanhydratlagerstätte und bei der Dissoziation von Methanhydrat im Feldmaßstab zu schaffen mit einer zeitlichen Auflösung von 3 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 0,25 Meter.

Während des Feldexperiments wurde die Temperaturverteilung entlang der zentralen Produktionsbohrung und der beiden benachbarten Beobachtungsbohrungen zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Durch den Einsatz faseroptischer Temperaturmesstechnik (Distributed Temperature Sensing, DTS) können kontinuierliche Temperaturprofile entlang der Bohrlöcher mit hoher zeitlicher Auflösung registriert werden. Eine Besonderheit stellt der Einbau der Messkabel hinter der Verrohrung im Ringraum des Bohrlochs dar (Abb. 14). Nach Abschluss des ca. 2-monatigen Beobachtungszeitraumes während der Hauptphase der Feldarbeiten von Januar bis März 2002 wurden in Zusammenarbeit mit dem Geological Survey of Canada im Oktober 2002 und September 2003 Wiederholungsmessungen der Bohrlochtemperaturen durchgeführt (Abb. 15).

Bei allen Bohrungen ist ein kontinuierlicher Angleichprozess der Bohrlochtemperatur an die Temperatur der umgebenden Gesteinsformationen zu beobachten (Abb. 16). Nach ca. 21 Monaten, was ca. der 48-fachen Bohrzeit entspricht, hat sich die Temperatur der 3L- und 4L-Bohrungen weitgehend dem ungestörten Zustand angenähert. Mit Hilfe der „Horner-Plot-Methode“ wurde für diesen Zeitpunkt eine Abweichung von ca. $\pm 0,1$ °C vom thermischen Gleichgewicht bestimmt. Lediglich innerhalb der obersten 200 m der 5L-Bohrung kann noch eine stärkere Temperaturstörung, die hier von der thermischen Stimulation des Bohrlochs herrührt (keine Abbildung), beobachtet werden.



Abb. 14: Permanente Installation der faseroptischen Sensorkabel. Die Messkabel wurden mit Hilfe spezieller Kabelschellen befestigt und zusammen mit der Verrohrung in das Bohrloch eingebaut (Foto: J. Henniges, GFZ).

Permanent installation of the fibre-optic DTS cables. The sensor cables were attached with custom-built cable clamps during the installation of the borehole casing.



Abb. 15: (Oben) DTS-Messungen am 7. Oktober 2002, d.h. 9 Monate nach der Bohrung. Die rote Stahlbox wurde auf der verfüllten Bohrung errichtet und enthält die obertägigen Enden der permanent installierten faseroptischen Sensorkabel (Foto: Applejohn, Inuvik Research Centre). (Unten) DTS Temperaturmessungen am 20. September 2003, d.h. 1 3/4 Jahre nach der Bohrung. Das Foto zeigt die für den Betrieb der DTS-Apparatur und des Generators errichteten Zelte. Während das Arbeitsgebiet im Winter über Eisstraßen zugänglich war, kann es in den Sommer- und Herbstmonaten nur per Hubschrauber erreicht werden (Fotos: J. Henniges, GFZ).

(Top) DTS survey on October 7, 2002, i.e. 9 month after drilling. The red steel box was built on top of the abandoned well in order to protect the surface ends of the fibre-optic sensor cables. (Bottom) DTS survey on September 20, 2003, i.e. 1 3/4 years after drilling. Picture shows tents for deployment of the DTS apparatus and the generator. While the site was accessible through ice roads during winter, it can only be reached by helicopter in the summer and fall.

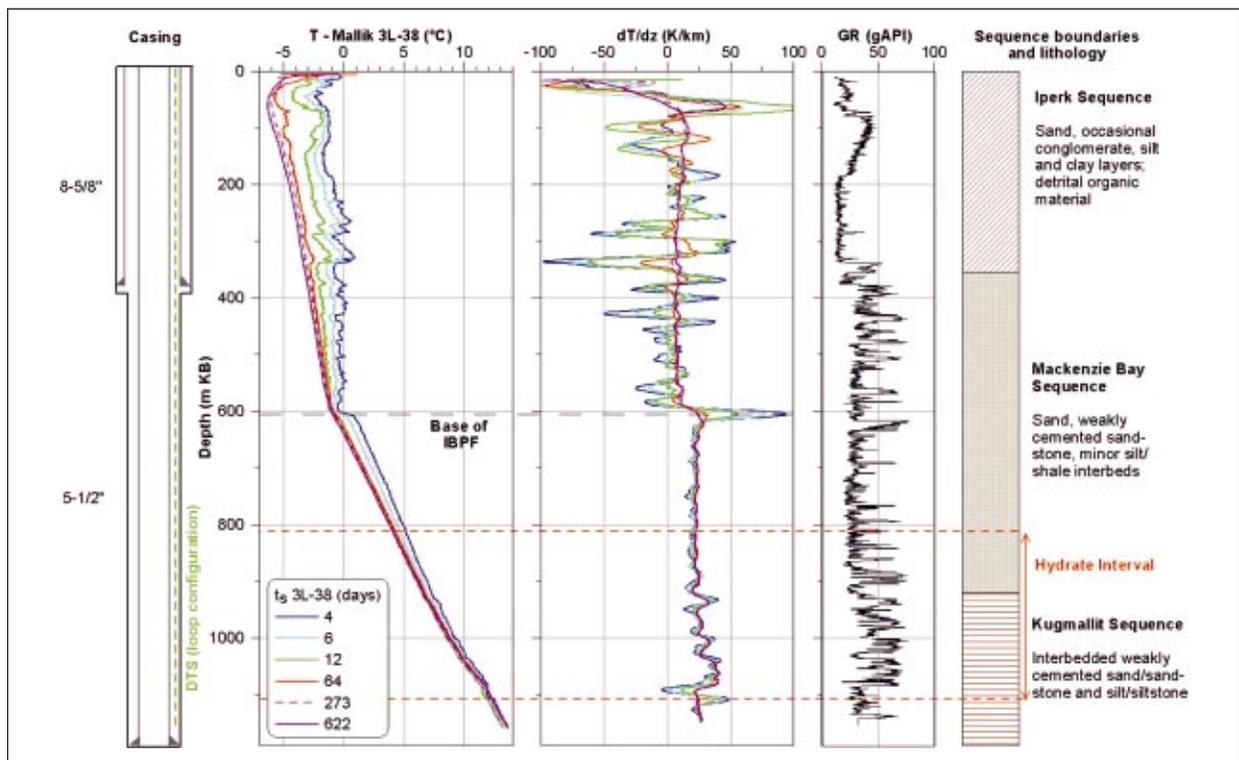


Abb. 16: Temperaturprofile (T) und 20-m-Mittelwerte des Temperaturgradienten (dT/dz) der Mallik 3L-Beobachtungsbohrung für verschiedene Zeitpunkte nach Bohrende (t_s). Die Basis des Permafrost (IBPF) und der Methanhydratvorkommen sind jeweils durch eine sinusförmige Änderung des Temperaturgradienten gekennzeichnet, die sich im Verlauf der Zeit zunehmend zurückbildet. Die Gamma-Intensität (GR) ist vom Ausbau des Bohrlochs beeinflusst (Cased-Hole-Log). Sequenzgrenzen und lithologische Beschreibung verändert nach Dallimore et al. (1999). 273-day-Temperaturprofil: unsichere Kalibrierung.

Temperature profiles (T) and 20-m average temperature gradient (dT/dz) of the Mallik 3L observation well for successive times after completion of the well (t_s). The base of the ice-bearing permafrost (IBPF) and gas hydrate occurrences are respectively marked by a sinusoidal change of the temperature gradient, which gradually diminishes with time. The gamma-response (GR) is affected by the casing (cased-hole log). Sequence boundaries and lithological description modified after Dallimore et al. (1999). 273-day temperature profile: uncertain calibration.

Die Temperaturprofile zeigen Merkmale, die typisch für Bohrungen in Permafrostgebieten sind, wie z.B. einen stufenartig ausgeprägten Anstieg der Temperaturen an der Basis des eisreichen Permafrost kurz nach Fertigstellung der Bohrungen (Abb. 17). Die aus diesem charakteristischen Merkmal abgeleitete Tiefe der Basis des eisreichen Permafrost steigt von $604 \pm 3,5$ m bei der Mallik-3L-Bohrung bis auf $609 \pm 3,5$ m in der Mallik-4L-Bohrung an. Erstmals wurde an der Basis der Methanhydratvorkommen ein ähnlicher Effekt beobachtet (Abb. 16), was auf den Verbrauch latenter Wärme bei der Zersetzung von Methanhydrat während der Zementierung der Bohrungen zurückgeführt wird. Die aus den Temperatur-Logs abgeleitete Tiefe der Basis der Methanhydratvorkommen sinkt von $1104 \pm 3,5$ m bei der Bohrung Mallik 3L bis auf $1109 \pm 3,5$ m in der Bohrung Mallik 4L an und weist somit den gleichen Trend auf wie die Basis des eisreichen Permafrost.

Der mittlere geothermische Gradient steigt von rd. 7,7 K/km in der Permafrost-Schicht auf rd. 23,8 K/km in den darunter liegenden eisfreien Sedimentschichten an (Abb. 16), was vorrangig auf den Kontrast der Wärmeleitfähigkeit der Porenfluide in gefrorenem und ungefrorenem Zustand zurückgeführt wird. Unterhalb der Basis des eisreichen Permafrost werden Änderungen des geothermischen Gradienten maßgeblich von lithologischen Wechseln bestimmt, die mit Änderungen der Wärmeleitfähigkeit der Sedimente einhergehen (Abb. 17). Der Einfluss des Methanhydratgehalts auf die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins spielt offenbar nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu lithologischen Änderungen der Gesteinsmatrix.

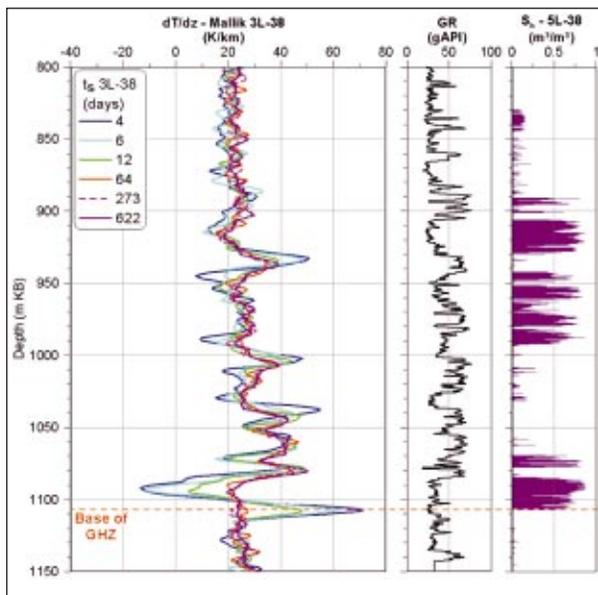


Abb. 17: Detaildarstellung des Temperaturgradienten (10 m-Mittelwerte, dT/dz) und des Gamma-Ray Logs der Beobachtungsbohrung Mallik-3L innerhalb der Zone der Methanhydratvorkommen (GHZ). Die Hydratsättigung (S_h , Anteil an der Gesamtporosität) wurde anhand der Differenz der Dichte- und NMR-Porositäts-Logs der 5- Bohrung abgeschätzt (Kleinberg et al., 2004).

Detail of 10-m average temperature gradients (dT/dz) and gamma-ray log, Mallik 3L observation well, within the zone of the gas hydrate occurrences (GHZ). Hydrate saturation (S_h , fraction of total porosity) estimated from difference of density- and NMR-porosity logs from the 5L well (Kleinberg et al., 2004).

Für eine quantitative Bestimmung der thermischen Eigenschaften methanhydratführender Sedimente sind weiterführende Laborexperimente unter in-situ Bedingungen notwendig. Die Temperaturdaten bilden weiterhin eine wichtige Grundlage für die Quantifizierung des Einflusses von Klimavariationen auf das Temperaturfeld im Untergrund und die Destabilisierung von natürlichen Methanhydrat-Vorkommen.

Das Mallik Data and Information System

Ziel des „Mallik Data and Information System“ ist die zeitnahe und weltweite Bereitstellung der Informationen und Daten, die während des „Lebenszyklus“ (Abb. 18), des „Mallik Gas Hydrate Research Well Programm“ erhoben wurden, sowie die Durchführung eines auf den Nutzer abgestimmten Daten- und Informationsmanagements. Es unterstützt die Akquisition, die Integration und die Verteilung sämtlicher Daten und erstellt ein für die einzelnen Projektteilnehmer zugängliches Archiv der interdisziplinären Informationen. Das System wurde vom Daten- und Rechenzentrum gemeinsam mit der Operational Support Group geplant, entwickelt und betrieben, und besteht aus drei Hauptkomponenten:

Ein speziell für das Mallik-Projekt entworfenes „Mallik Drilling Information System (Mallik-DIS)“ für die direkte Dateneingabe vor Ort.

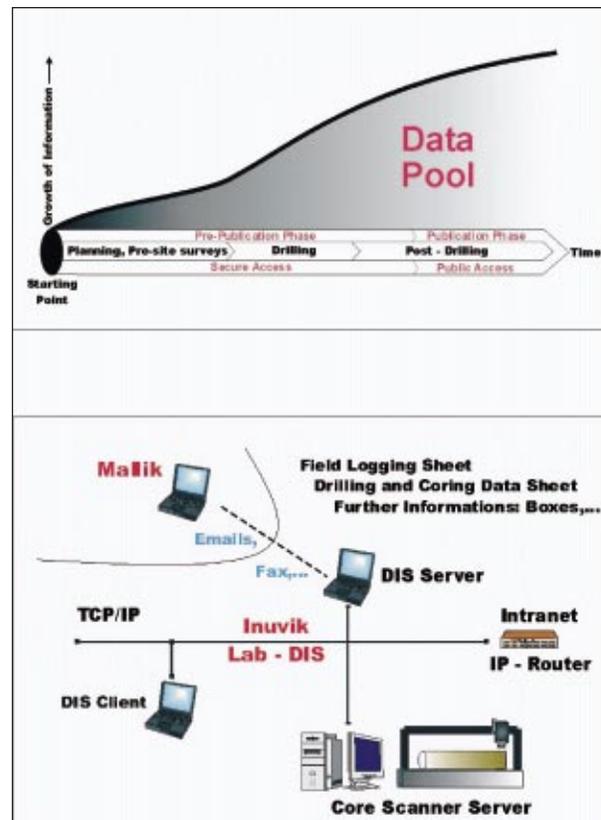


Abb. 18: (Oben) „Lebenszyklus“ von Bohrprojekten. (Unten) Struktur des internen Netzes am Inuvik Research Centre.

(Top) „Life Cycle“ of drilling projects. (Bottom) Internal Network Structure used at the Inuvik Research Center

Ein „Datenwarenhäus“

Ein Web-Portal innerhalb der Projektseiten des ICDP.

Das Mallik-DIS wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Smartcube (www.smartcube.de) auf Grundlage des GFZ-„Drilling Information Systems“ (DIS^{GFZ}) entwickelt. Es beinhaltet unter anderem einen digitalen Farbscanner der Firma DMT, welcher ein Verzeichnis hochauflösender digitaler Kernbilder erzeugt. Im Mallik-Feldlabor im Inuvik Research Center, etwa 180 km von der Bohrstelle in Mallik entfernt, wurde dieses Daten-Management-System und das entsprechende Netzwerk während der Bohrphase aufgebaut und eingesetzt (Abb. 19). Mit dem Kernscanner konnten sämtliche 210 Bohrkerne meist im gefrorenen Zustand ohne Probleme aufgenommen werden. Der gesamte Probenbestand, die im Gelände aufgenommenen Daten, allgemeine Bilder sowie die Kern-Bilder wurden in die Datenbank integriert. Jeden Tag wurde ein Bericht vom Bohrfortschritt angefertigt, der die allgemeinen Tagesberichte, Bohr-Tagesberichte, die Kernphotos, den Bohrfortschritt und weitere Daten, Informationen und

Photos enthält. Noch am selben Tag konnte dies alles durch das Mallik-DIS auf die ICDP-Web-Seiten gestellt werden, so dass jedes autorisierte Mitglied einen Überblick über den Fortschritt der Bohrungen bekommen und sich gegebenenfalls Daten vom Internet auf seine Festplatte speichern konnte.

Web Links:

ICDP Information Network: <http://www.icdp-online.de>

ICDP-Online:

<http://www.mallik.icdp-online.de>

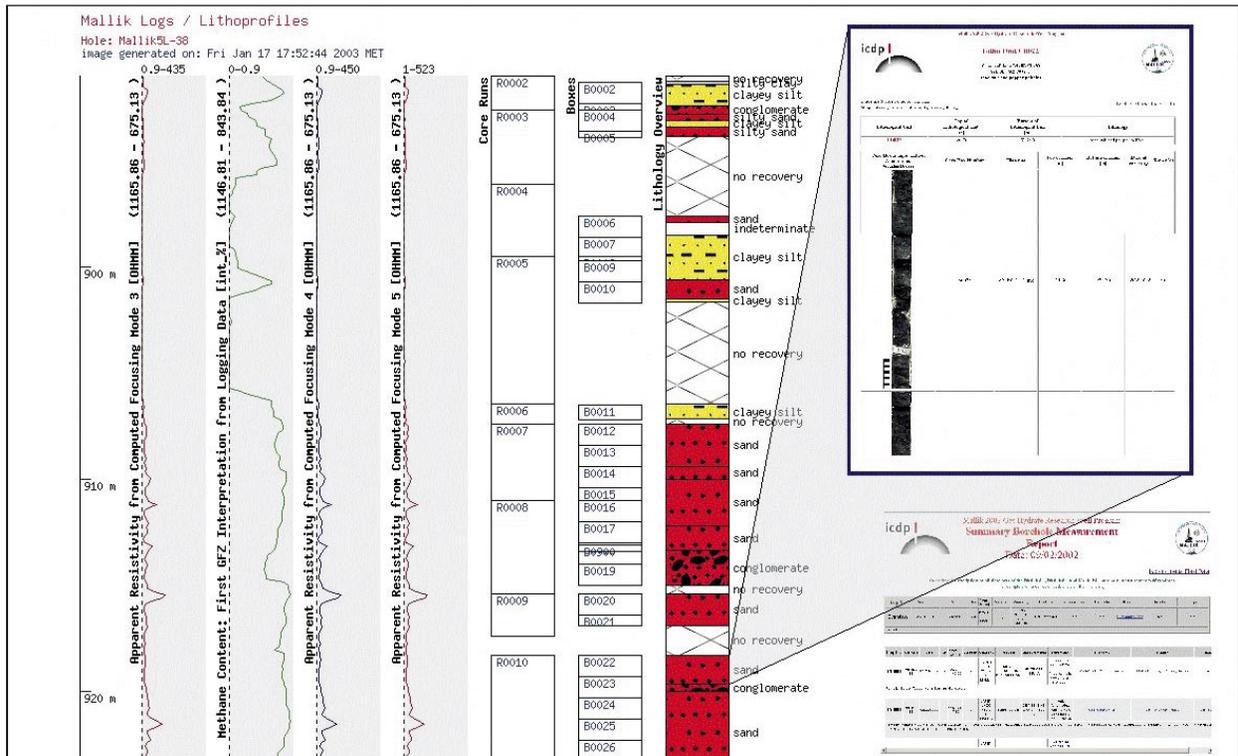


Abb. 19: Beispiele zur Visualisierung und Datenverteilung des Mallik-ICDP-Datenwarehouses, ausgewähltes lithologisches Profil von Mallik 5L.

Examples of the Mallik-ICDP-Data Warehouse: a selected section of the lithological profile Mallik 5L.

Die im Inuvik Research Center durch das Mallik-DIS erhobenen Daten fanden Eingang in das Datenwarehouse und werden in einer leistungsfähigen Datenbank verwaltet. Das dazugehörige Datenmodell wurde in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern erarbeitet und integriert die Ansprüche der einzelnen wissenschaftlichen Teilprojekte. Besonderer Wert wurde auf die Kontrolle der Daten, die Datenqualität, als auch auf die Sicherheit des Zugriffs gelegt.

Das Web-Portal stellt die Verbindung des Datenwarehouses bzw. der einzelnen Informationen zu den Nutzern, den technischen und wissenschaftlichen Mitarbeitern, über das Internet her. Es erlaubt den berechtigten Teilnehmern unter anderem die interaktive Suche und die Visualisierung von Daten, wie zum Beispiel dem lithologischen Bohrprofil (vgl. Abb. 19). Weiterhin stellt es die vollständigen Datensätze zur Verfügung. Das Mallik Web-Portal stellt außerdem eine Kommunikationsplattform aller beteiligten Personen dar. Insbesondere Sicherheitsaspekte spielten bei seiner Realisierung eine entscheidende Rolle.

Literatur

Dallimore, S.R., Collett, T.S., Weber, M.H., and Uchida, T., 2002: *Drilling program investigates permafrost gas hydrates*; EOS Transactions, American Geophysical Union, 83, 18, p. 193, 198.

Lorenson, T. D., Whiticar, M. J., Waseda, A., Dallimore, S. R., and Collett, T. S., 1999: *Gas composition and isotopic geochemistry of cuttings, core, and gas hydrate from the JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L gas hydrate research well. Scientific results from the JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L Gas Hydrate Research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada (ed.) S. R. Dallimore, T. Uchida, and T. S. Collett; Geological Survey of Canada, Bulletin 544, p. 145-161.*

Mallik compendium: *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, NW Territories, Canada*, Eds. S.R. Dallimore, T.S. Collett, T. Uchida, M. Weber, A. Chandra, T.H. Mroz, E.M. Caddell, and T. Inoue.

Haberer, R.M., Mangelsdorf, K., Dieckmann, V., Fuhrmann, A., Wilkes, H., and Horsfield, B., 2004: *Characterization of the organic matter from deep subsurface lignites at the Mallik 5L Gas Hydrate Research Well*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Henninges, J., Schroetter, J., Erbas, K., and Huenges, E., 2004: *Temperature field of the Mallik gas hydrate occurrence - implications on phase changes and thermal properties*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Kleinberg R.L., Faluam, C. and Collett, T.S., *Magnetic resonance log of Mallik-5L: Hydrate saturation, growth habit, relative permeability and control of accumulation*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Kulenkampff, J., and Spangenberg, E., 2004: *Physical properties of gas hydrate bearing sediments from the Mallik 5L research well simulated under in-situ conditions*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Loewner, R., and Conze, R., 2004: *The Mallik data and information system*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Mangelsdorf, K., Haberer, R.M., Zink, K.G., Dieckmann, V., Wilkes, H., and Horsfield, B., 2004: *Molecular evidence for the occurrence of a Deep Biosphere at the Mallik 5L Gas Hydrate Research Well*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Riedel, M., Kulenkampff, J., Spangenberg, E., and Dallimore, S., 2004: *Geophysical properties of sediments from Mallik 5L*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Wiersberg, T., Erzinger, J., Zimmer, M., Schicks, J., and Dahms, E., 2004: *Gas geochemical investigations on drill mud and core from the gas hydrate research wells Mallik 4L and Mallik 5L*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Bauer, K., Pratt, R.G., Weber, M.H., Haberland, Ch., and Shimizu, S., 2004: *Introduction, setting and initial data analysis for the Mallik 2002 crosswell seismic experiments*; Mallik 2002 compendium, submitted.

Pratt, R.G., Hou, F., Bauer, K., and Weber, M.H., 2004: *Waveform tomography images of velocity and inelastic attenuation from the Mallik 2002 cross-hole seismic surveys*; Mallik 2002 compendium, submitted.