Russisch-Deutsche Zusammenarbeit: System Laptev-See

Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See

Abschlussbericht

Zusammengefasst vom
Sekretariat System Laptev-See

Kiel, Dezember 2006

BMBF-Verbundvorhaben System Laptev-See: Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03G0589

Laufzeit: 1.7.2003 bis 31.8.2006

Wissenschaftliche Steuergruppe: Prof. Dr. Jörn Thiede (Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft), Dr. Heidemarie Kassens, Prof. Dr. Hans-Wolfgang Hubberten

Antragsteller:

Teilprojekt I
Dr. Heidemarie Kassens
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR)
Dienstgebäude Ostufer
Wischhofstrasse 1-3, Geb. 4
D 24148 Kiel
hkassens@ifm-geomar.de

Teilprojekt II
Prof. Dr. Hans-Wolfgang Hubberten
Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft
Postfach 600149
D 144101 Potsdam
hubbert@awi-potsdam.de

Teilprojekt III
Prof. Dr. Volkhard Spieß
Universität Bremen
Fachbereich Geo
Postfach 330440
D 28334 Bremen
vspiess@uni-bremen.de

Teilprojekt IV
Prof. Dr. Eva-Maria Pfeiffer
Universität Hamburg
Institut für Bodenkunde
Allende-Platz 2
D 20146 Hamburg
E.M.Pfeiffer@ifb.uni-hamburg.de

INHALTSVERZEICHNIS

Liste der verwendeten Abkürzungen

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG 1
Aufgabenstellung des Verbundvorhabens 1
Voraussetzungen des Verbundvorhabens 5
Planung und Ablauf des Verbundvorhabens 7
Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn 11
Zusammenarbeit mit anderen Stellen 13
Literatur 16

II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG 19
AG 1: Mikrobiell gesteuerte Prozesse im Permafrost 19
AG 2: Geochemische Prozesse beim Versinken des Landpermafrostes 25
AG 3: Stadien der Permafrostentwicklung 33
AG 4: Temperaturfelder im Permafrost 45
AG 5: Charakterisierung des Ablagerungsmilieus von submarinem Permafrost 53
AG 6: Seismische Feinstrukturen submariner Permafrostabfolgen 61
AG 7: Rezente Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes 73
AG 8: Koordination 83

III. ERFOLGSKONTROLLBERICHT 85
Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms 85
Wissenschaftlicher und technischer Erfolg des Verbundvorhabens 85
Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplans 85
Verwertbarkeit der Ergebnisse 86
Erfindungen und Schutzrechte 88
Ungelöste Arbeitsansätze 88

IV. BERICHTSBLATT 89

V. ANHANG 93
Ehrungen und Auszeichnungen der ProjektmitarbeiterInnen
Relevante Veröffentlichungen der ProjektmitarbeiterInnen
Langfristige Aufenthalte von GastwissenschaftlerInnen
Presseberichte
Internetauftritt
Wochenberichte der Expeditionen
Tagungsband des 8. Arbeitstreffens

Liste der verwendeten Abkürzungen

AARI	State Research Center - Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg
ACCO-Net	Arctic Circumpolar Coastal Observatory Network
ACD	Artic Coastal Dynamics
ACSYS	Arctic Climate System Studies
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AG	Arbeitsgruppe
AGU	American Geophysical Union
AOSB	Arctic Ocean Science Board
APARD	Arctic Paleo River Discharge
AWI	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAPE	Circumpolar Arctic Paleoenvironments
DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ESF	European Science Foundation
EUCOP	European Conference on Permafrost
FATE	Feedback on Arctic Terrestrial Ecosystems
FEM	Finite-Elemente-Modell
FS	Forschungsschiff
GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystem
GTN-P	Global Terrestrial Network for Permafrost
IAPP	International Arctic Polynya Program
IASC	International Arctic Science Committee
IBCAO	International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean
ICARP II	2nd International Conference on Arctic Research Planning
ICBM	Institut für Chemie und Biologie des Meeres
IFM-GEOMAR	Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IODP	Integrated Ocean Drilling Program
IPA	International Permafrost Association
IPY	International Polar Year
ISI	Institute for Scientific Information
J.v.h.	Jahre vor heute
LDR	Lena Delta Reserve, Tiksi
LOICZ	Land-Ocean-Interactions in the Coastal Zone
LOIRA	Land-Ocean Interactions in the Russian Arctic
MIS	Marine Isotope Stage
MSU	Moscow State University
NABOS	Nansen and Amundsen Basin Observational System
NAD	Nansen Arctic Drilling Program
ODP	Ocean Drilling Program
OSL	Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung, St. Petersburg
PAGES	Past Global Changes
PIY	Permafrost Institute Yakutsk
PLEL	Phosphoetherlipide
PLFA	Phospholipid-Fettsäure

QUEEN	Quaternary Environment of the Eurasian North
RAS	Russian Academy of Sciences
RMSD	Root Mean Square Deviation
SB RAS	Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
SIO	P.P. Shirshov Institute for Oceanology RAS, Moscow
SPbU	St. Petersburg State University
TP	Teilprojekt
TU	Technische Universität
TWT	Two Way Travel
UB	Universität Bremen
VNIIO	VNIIOkeangeologia, St. Petersburg

I. SCHLUSSBERICHT – KURZE DARSTELLUNG

Aufgabenstellung des Verbundvorhabens

Permafrost mit Mächtigkeiten von bis zu 1000 m prägt die Landschaft Zentralnordsibiriens und den Meeresboden der nördlich angrenzenden Laptev-See (Abb. 1). Die Dynamik und Geschichte des Permafrostes sind wegen der möglichen Methanfreisetzung und deren Klimafolgen von weltweiter Bedeutung, da in und unter dem Permafrost große Gashydratvorkommen vermutet werden. Insbesondere unter Seen, Flüssen und am Meeresboden der Laptev-See kann es zur Bildung tiefgreifender Auftauzonen kommen, die ein Entweichen dieser Gase ermöglichen. Obwohl dem submarinen Permafrost im globalen Klimasystem eine wichtige Rolle zukommt, war das Wissen um seine rezente Dynamik bei Antragstellung fast unbekannt.

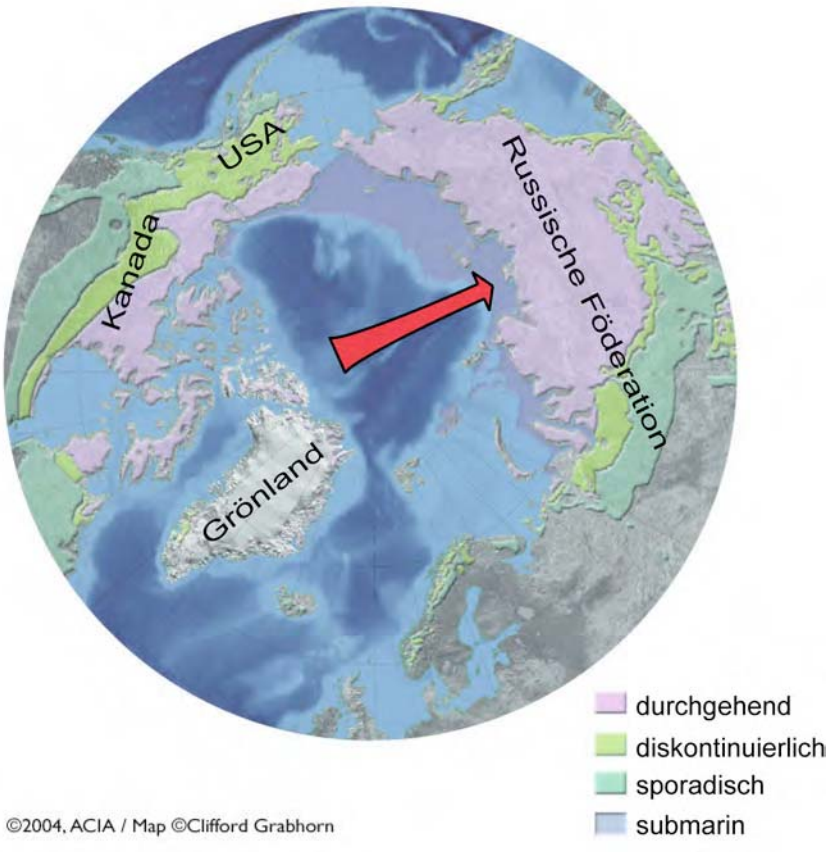

Abb. 1: Die Verbreitung von Permafrost in der Arktis. Die Laptev-See mit dem angrenzenden sibirischen Hinterland (roter Pfeil) ist das Arbeitsgebiet der Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes.

Im Rahmen des Verbundvorhabens „System Laptev-See: Prozessstudien zur Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See“ wurden fächerübergreifende Prozessstudien über das Vor-

kommen, die Bildung sowie die Auf- und Abbauprozesse des submarinen Permafrostes durchgeführt. Inwieweit Austauschprozesse und Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und dem Meeresboden eine Destabilisierung des submarinen Permafrostes bewirken, war eine zentrale Fragestellung in diesem Verbundvorhaben.

Die wissenschaftliche Zielsetzung des Verbundvorhabens konzentrierte sich dabei auf folgende Themenfelder:

- Mikrobiell gesteuerte Prozesse im Permafrost

Die mikrobiell gesteuerten Prozesse sollten quantifiziert und damit ihre Bedeutung für die Regulierung der biogeochemischen Stoffkreisläufe im Permafrost eingeschätzt werden. Darüber hinaus sollten die Diversität und Anpassungspotenziale der beteiligten Mikroorganismen bestimmt werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Wandel der dominanten mikrobiellen und geochemischen Prozesse im Übergang von terrestrischem zu submarinem Permafrost. Aus dem Vergleich der marinen und terrestrischen Permafrosthabitate sollten Prognosen für die Entwicklung und Dynamik des Permafrostes im Zuge von möglichen Klimaänderungen im Laptev-See-Gebiet abgeleitet werden.

- Geochemische Prozesse beim Versinken des Landpermafrostes

Die geochemischen Prozesse bei Wechselwirkungen zwischen Meerwasser und Permafrost sollten entschlüsselt werden. Die durch Erosion geprägten Küsten der Laptev-See wurden dazu als natürliches Labor genutzt. Der Rückzug der Küstenlinie durch Erosion führt dazu, dass terrestrischer Permafrost kontinuierlich in submarinen Permafrost umgewandelt wird. Je größer der Abstand von der Küste, desto länger steht der ehemals terrestrische Permafrost mit Meerwasser im Kontakt. Die geochemischen Untersuchungen sollen den Ausgangszustand, nämlich den unveränderten terrestrischen Permafrost, sowie den submarinen Permafrost der zentralen Laptev-See umfassen.

- Stadien der Permafrostentwicklung

Klimawechsel und Meeresspiegelschwankungen führten auf dem durch mächtige pleistozäne Permafrostablagerungen geprägten Laptev-See-Schelf und in den angrenzenden Küstenregionen zu Veränderungen in Zustand und Stabilität des Permafrostes, die sich in Faziesänderungen mit unterschiedlichen sedimentologischen und geokryologischen Eigenschaften doku-

mentieren. Um die Dynamik des Permafrostes zu verstehen, sollten ausgehend vom terrestrischen Permafrost am Küstenaufschluss von Mamontovy Klyk (Expedition COAST I) über die Land- und Küstenbohrungen bis hin zur Schelfbohrung (Abb. 2) verschiedene Stadien der Permafrostentwicklung sowie der submarinen Sediment- und Permafrostneubildung bestimmt werden. Zur Charakterisierung und späteren Differenzierung der Abfolgen sollten sedimentologische und geokryologische Untersuchungen der gefrorenen und ungefrorenen Sequenzen in allen Bohrungen und dem Küstenaufschluss durchgeführt werden. Ziel war es, die Faziesbedingungen bei der Entstehung von terrestrischen und submarinen Permafrostsedimenten zu rekonstruieren und die zeitliche Entwicklung abzuleiten.

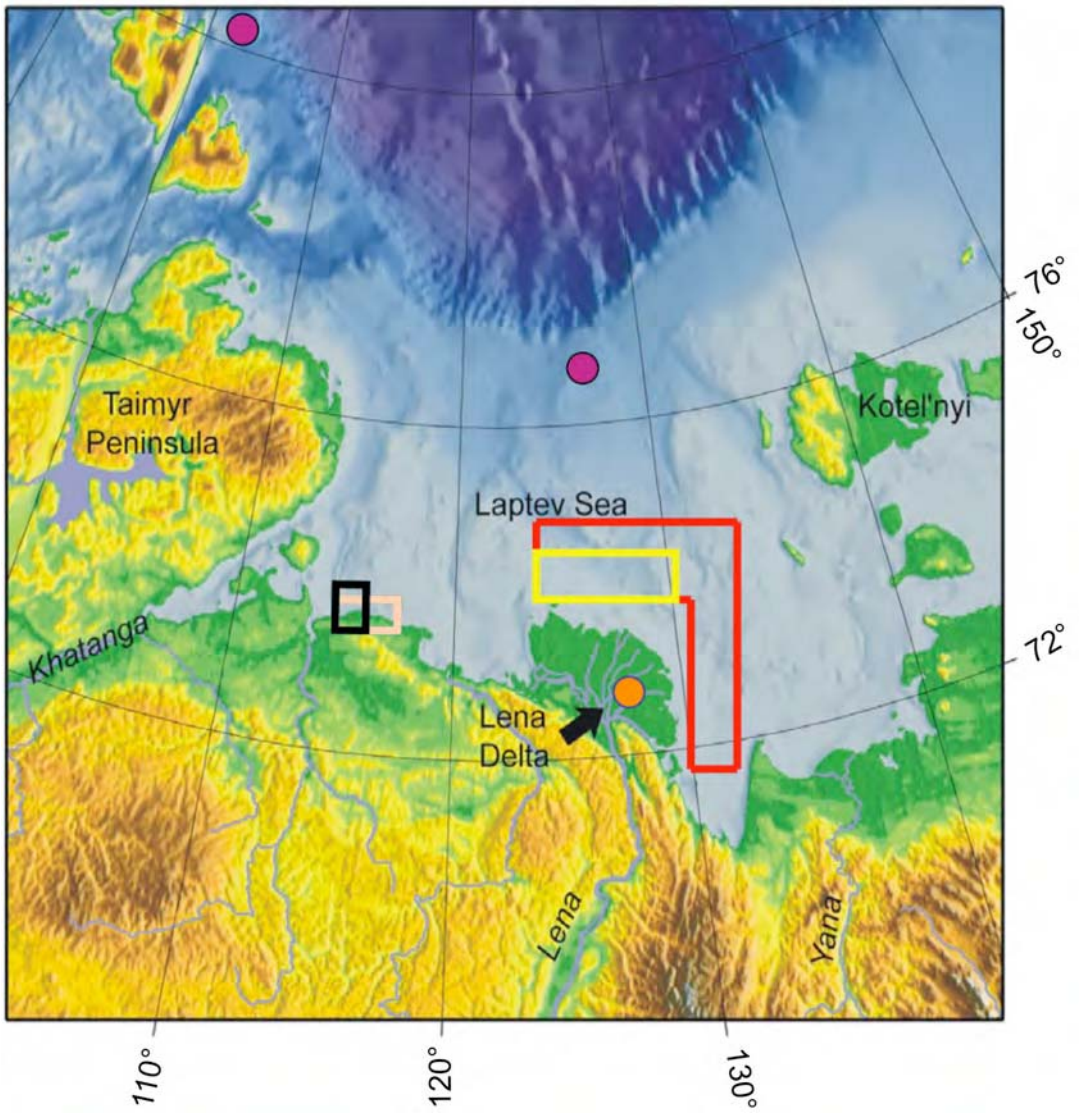

Abb. 2: Karte der Laptev-See mit den Arbeitsgebieten der Expeditionen: orange – Lena-Anabar 2003 (Fahrtabschnitt Samoylov), LENA 2004 und LENA 2005; lachsfarben – Lena-Anabar 2003 (Fahrtabschnitt „Mammuteckzahn“); gelb – TRANSDRIFT IX (2003); rot – TRANSDRIFT X (2004); schwarz – COAST I (2005); pink – Bodenstationen NABOS 2005.

- Temperaturfelder im Permafrost

Der heutige Zustand des submarinen Permafrostes sollte anhand von Temperaturmessungen im terrestrischen und submarinen Permafrost untersucht werden. Zusätzlich sollten die Anregungsfaktoren des submarinen Tauprozesses durch Erfassung der Temperaturfelder der Wassersäule beschrieben werden. Um ein Abbild der zeitlichen Veränderung des überfluteten Permafrostes zu erhalten, sollten die Temperaturfelder räumlich aufgelöst, d. h. von der heutigen Küstenlinie bis in tiefere und damit länger überflutete Bereiche angelegt werden. Die Ergebnisse ermöglichen die Modellierung der Stabilität des submarinen Permafrostes.

- Charakterisierung des Ablagerungsmilieus von submarinem Permafrost

Die heutigen Schelfgebiete der sibirischen Arktis haben sich im Pleistozän langfristig als terrestrische Permafrostgebiete entwickelt. Dabei kommt dem eng gekoppelten Land-Schelf-System der Laptev-See mit seinen komplexen hydrologisch-meteorologischen Verbindungen eine zentrale Rolle für Untersuchungen von arktischen Umweltveränderungen zu. Daher sollten die Auswirkungen von unterschiedlichen Meeresspiegelständen auf die Stabilität des submarinen Permafrostes untersucht werden. Dies umfasst die Rekonstruktion und die Entschlüsselung der geschichtlichen Dynamik des permafrostgeprägten Ablagerungsmilieus auf dem Schelf durch Transformation, Erosion und Neubildung. Hierbei sollten insbesondere mikropaläontologische und biostratigraphische Untersuchungen durchgeführt werden.

- Seismische Feinstrukturen submariner Permafrostabfolgen

Marin-seismische Erkungungsmethoden sollten detaillierte räumliche Informationen über die Verteilung und die Eigenschaften von submarinem Permafrost liefern. Auf Übersichtsprofilen zwischen dem Lena-Delta und der zentralen Laptev-See sollten deshalb seismische Feinstrukturen in submarinen Permafrostabfolgen kartiert werden. Von besonderem Interesse waren dabei die Erkundung der Permafrostoberkante und die Identifikation des Paläo-Lena-Deltas und assoziierter Taliks sowie der Abfolgen mit den durch den holozänen Meeresspiegelanstieg entstandenen sedimetären Sequenzen. Dazu sollte erstmals im Flachwasserbereich Mehrkanalseismik mit hohen Signalfrequenzen für Detailuntersuchungen mit einem 3D-seismischen Messnetz eingesetzt werden.

- Rezente Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes

Die Stabilitätsfaktoren des Permafrostes in der Laptev-See sollten charakterisiert werden. Dazu sollten hydrodynamische Prozesse und ihre saisonale Variabilität in der Küstenzone und im mittleren Schelfbereich ermittelt und ihre Wechselwirkungen mit dem submarinen Permafrost entschlüsselt werden. Von besonderer Bedeutung sind dabei Änderungen der Salz- und Temperaturverteilung in der Wassersäule, die einen direkten Einfluss auf das energetische Gleichgewicht im submarinen Permafrost haben. Das hydrodynamische System der Laptev-See reagiert besonders sensibel auf den atmosphärischen Antrieb, z. B. mit Veränderungen in den Strömungen, der thermohalinen Schichtung und der Eisbedeckung. Durch die Erfassung der Dynamik in der Wassersäule und ihrer Wechselwirkungen mit dem submarinen Permafrost sollten Vorhersagen über mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Stabilität des submarinen Permafrostes getroffen werden.

- Koordination

Die wissenschaftliche Steuergruppe und das Sekretariat „System Laptev-See“ sollten die vielfältigen Aktivitäten der deutschen Seite bündeln und mit den russischen Verbundpartnern abstimmen. Das Sekretariat „System Laptev-See“ am IFM-GEOMAR sollte dabei als Schnittstelle für die Kommunikation innerhalb der Teilprojekte und Arbeitsgruppen, zwischen den russischen und den deutschen Verbundpartnern, mit dem Otto-Schmidt-Labor für Polar- und Meeresforschung (OSL) sowie mit den zuständigen Behörden in Russland, Jakutien und Deutschland dienen. Die Vorbereitung und Durchführung der Expeditionen, die nationalen und bilateralen Arbeitstreffen sowie der Gastwissenschaftleraustausch standen im Mittelpunkt der Arbeiten.

Voraussetzungen des Verbundvorhabens

Die Mitglieder der Steuergruppe, die Antragsteller und die Arbeitsgruppenleiter verfügten bei Antragstellung bereits über langjährige Erfahrungen in der Polarforschung und in der deutsch-russischen Zusammenarbeit. So war bei den gemeinsamen Forschungsarbeiten im Rahmen des russisch-deutschen Forschungsprojektes „System Laptev-See“ seit Beginn der 90er Jahre eine enge wissenschaftliche Partnerschaft zwischen den WissenschaftlerInnen aus Deutschland, Russland und Jakutien gewachsen, die das Fundament für die Realisierung des Verbundvorhabens bildete. Von besonderer Bedeutung war dabei das Otto-Schmidt-Labor für Polar-

und Meeresforschung (vgl. BMBF-Vorhaben 03PL037A und 03PL038A). Auf dieser Grundlage war es gelungen, gemeinsam einen einzigartigen Proben- und Datensatz aus der Laptev-See und dem sibirischen Hinterland zu erarbeiten. Diese umfangreichen Ergebnisse dienten als breite Basis, auf der die Fragestellungen des Verbundvorhabens fundiert bearbeitet werden konnten. Da qualifizierte Prozessstudien nur in Regionen durchgeführt werden können, in denen grundlegende Daten zur Erfassung des Umweltsystems bereits vorliegen, waren die Laptev-See und der angrenzende Küstenbereich hervorragende Untersuchungsgebiete.

Die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit mit den russischen Partnerinstitutionen war durch parallel laufende Förderanträge über das russische Ministerium für Bildung und Wissenschaft gesichert. Diese Anträge wurden in direkter Abstimmung mit den deutschen Kooperationspartnern formuliert. Insgesamt wurde von den beteiligten Institutionen ein großer Teil der erforderlichen Personal-, Sach- und Expeditionskosten in Eigenleistung erbracht.

Die Themenfelder und die Struktur des Verbundvorhabens mit den vier Teilprojekten (TP) und acht Arbeitsgruppen (AG) zeigt Abbildung 3.

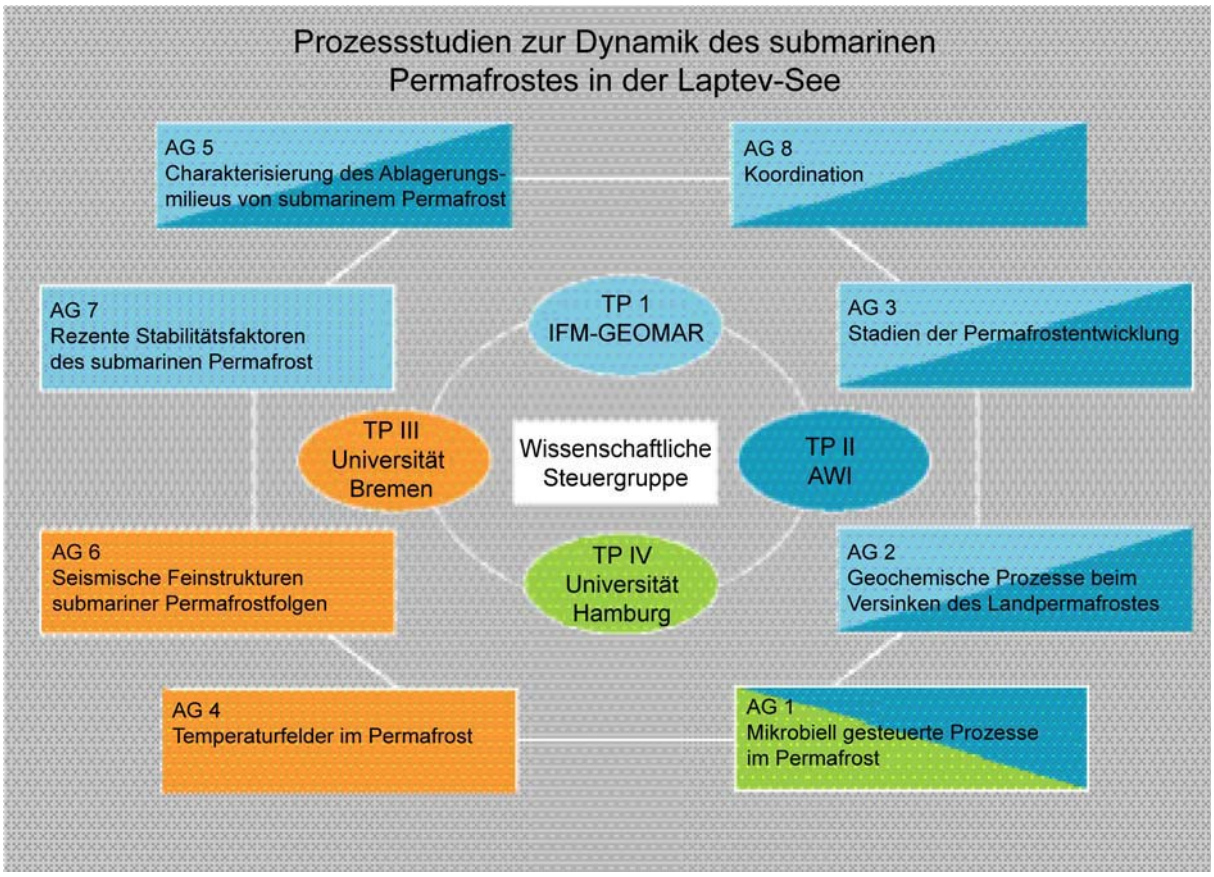

Abb. 3: Die Themenfelder und die Struktur des Verbundvorhabens mit den vier Teilprojekten (TP) und acht Arbeitsgruppen (AG).

Die thematischen Arbeitsgruppen wurden aus administrativen Gründen in übergreifenden Teilprojekten zusammengefasst (Tab. 1). Die Koordination des Verbundvorhabens einschließlich der Planung und Durchführung der Expeditionen wurde von der wissenschaftlichen Steuergruppe gemeinsam mit der Arbeitsgruppe 8 (Koordination) durchgeführt.

Tab. 1: Die Teilprojekte mit den jeweiligen Leitern und durchführenden Institutionen sowie die Arbeitsgruppen mit den jeweiligen AG-Leitern

Wissenschaftliche Steuergruppe unter der Leitung von J. Thiede		
Teilprojekt	**Institut**	**TP-Leiter**
I	Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR	H. Kassens
II	Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung	H.-W. Hubberten
III	Universität Bremen	V. Spieß
IV	Universität Hamburg	E.-M. Pfeiffer

Arbeitsgruppe	**Titel**	**Deutsche und russische AG-Leiter**
1	Mikrobiell gesteuerte Prozesse im Permafrost	E.-M. Pfeiffer (Universität Hamburg) E. Lebedeva (Institute for Microbiology, Moskau)
2	Geochemische Prozesse beim Versinken des Landpermafrostes	V. Rachold (AWI, Potsdam) M. Grigoriev (PIY, Jakutsk)
3	Stadien der Permafrostentwicklung	L. Schirrmeister (AWI, Potsdam) T. Müller-Lupp (IFM-GEOMAR, Kiel) S. Drachev (VNIIO, St. Petersburg)
4	Temperaturfelder im Permafrost	N. Kaul (Universität Bremen) N. Romanovskii (MSU, Moskau)
5	Charakterisierung des Ablagerungsmilieus von submarinem Permafrost	H. Bauch (Akademie der Wissenschaften und der Literatur, Mainz) E. Taldenkova (MSU, Moskau)
6	Seismische Feinstrukturen submariner Permafrostabfolgen	V. Spieß (Universität Bremen) S. Drachev (VNIIO, St. Petersburg)
7	Rezente Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes	J. Hölemann (AWI, Bremerhaven) L. Timokhov (AARI/OSL, St. Petersburg)
8	Koordination	H. Kassens (IFM-GEOMAR, Kiel) L. Timokhov (AARI/OSL, St. Petersburg)

Planung und Ablauf des Verbundvorhabens

Während der Schiffs- und Landexpeditionen (Abb. 4) sollten in zwei Schlüsselgebieten (s. Abb. 2) Bohrungen in den terrestrischen und submarinen Permafrost abgeteuft, ein Küstenaufschluss aufgenommen, vierdimensionale Temperaturfelder erfasst und Probenmate-

rial für mikrobiologische, sedimentologische, sedimentphysikalische, geochemische, biostratigraphische und paläontologische Untersuchungen gewonnen werden. Auch sollten seismische Feinstrukturen der submarinen Permafrostabfolgen vermessen und Meeresbodenobservatorien für Langzeitbeobachtungen hydrographischer Parameter verankert werden. Alle Arbeiten sollten durch den Einsatz von Fernerkundungsmethoden und mathematischen Modellierungen gestützt werden. Die Laboruntersuchungen und die Auswertung der Ergebnisse sollten auch im OSL durchgeführt werden, d. h. die Einbindung von OSL-Stipendiatengruppen war ein wichtiger Meilenstein im Verlauf des Verbundvorhabens.

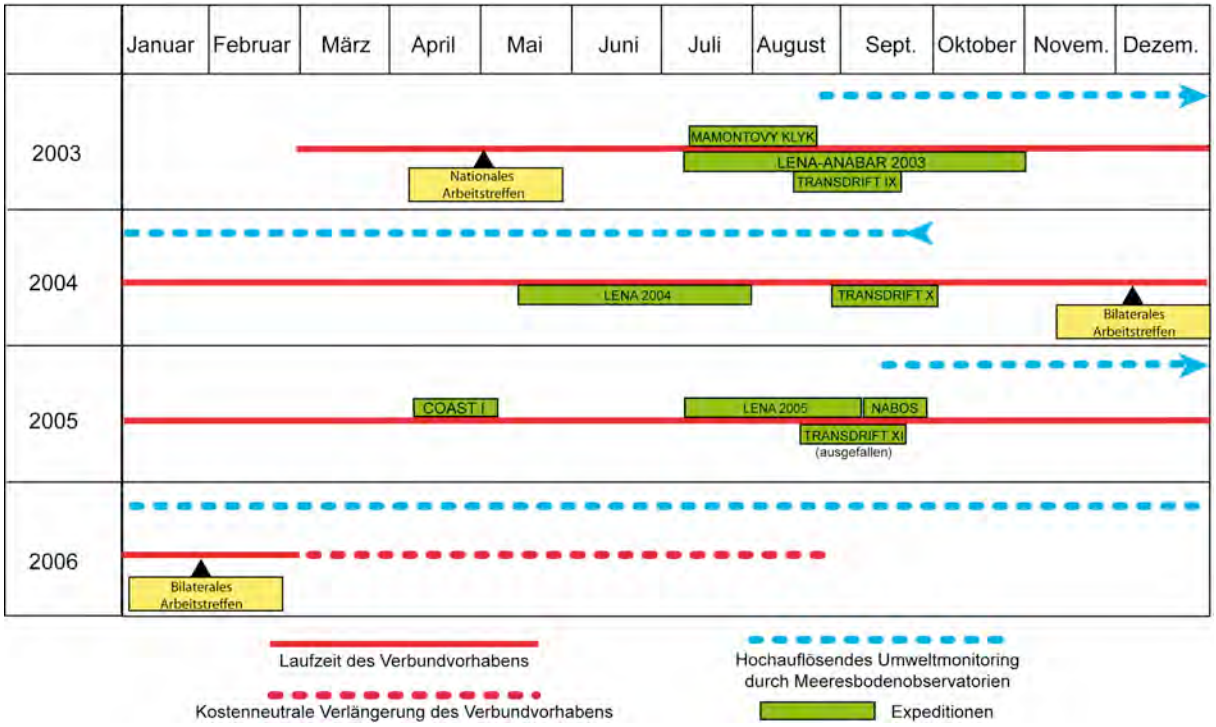

Abb. 4: Zusammenfassende Darstellung der Meilensteine des Verbundvorhabens.

Insgesamt wurden im Berichtszeitraum drei Schiffsexpeditionen (TRANSDRIFT IX, 2003; TRANSDRIFT X, 2004; in Zusammenarbeit mit dem International Arctic Research Center, Fairbanks, Alaska: NABOS 2005) sowie vier Landexpeditionen (Lena-Anabar 2003, LENA 2004, COAST I und LENA 2005) durchgeführt (s. Abb. 2). Bei den Landexpeditionen Lena-Anabar 2003, LENA 2004 und LENA 2005 wurden mit Hilfe der automatischen meteorologischen Station auf der Samoylov-Insel jeweils meteorologische Parameter für den Verlauf eines Jahres aufgezeichnet. Insgesamt wurden wichtige neue Erkenntnisse zur Entwicklung der südlichen Küstenzone der Laptev-See gewonnen. Der Unterlauf des Arynskij-Kanals im Lena-Delta wurde erstmals geologisch-geomorphologisch untersucht (LENA 2004).

Die Expedition COAST I war ursprünglich für 2004 geplant, musste jedoch aufgrund von

Problemen bei der Erteilung der Forschungsgenehmigung durch die russischen Behörden auf das Jahr 2005 verschoben werden. Während der Expedition wurden auf einem Übersichtsprofil elf wissenschaftliche Bohrungen mit maximal 32,5 m abgeteuft. Des Weiteren wurden auf einem Profil von bis zu 12 km vor der Küste in der Region um „Mamontovy Klyk“ sechs Bohrlöcher mit einer maximalen Teufe von 78 m erbohrt. Dabei wurden die Bedeutung der arktischen Böden als Quelle klimarelevanter Gase sowie die Dynamik der Küsten- und Flussbettprozesse untersucht, um den Sediment- und Kohlenstoffeintrag in die Laptev-See zu bestimmen. Neue Daten zur Morphologie der Permafrostoberfläche sowie zur Struktur, zu den chemischen Prozessen und zum Temperaturregime der Oberkante des Permafrostes im küstennahen Schelfbereich wurden erhoben.

Während der Schiffsexpedition TRANSDRIFT IX im Jahr 2003 wurden auf dem Laptev-See-Schelf für ein Jahr zwei ozeanographische Meeresbodenobservatorien mit akustischen Strömungsmessern (ADCP) verankert. Eine Station wurde während der Expedition TRANSDRIFT X im Jahre 2004 erfolgreich geborgen und lieferte neue, einzigartige Daten über die jahreszeitliche Variabilität der ozeanographischen Parameter, u. a. Temperatur und Strömung. Ein Höhepunkt der Expedition TRANSDRIFT X war die erfolgreiche Aufzeichnung von seismischen Daten auf über 1200 km Profillänge. Dazu wurde erstmals im Flachwasserbereich Mehrkanalseismik mit hohen Signalfrequenzen eingesetzt.

Die für den Sommer 2004 geplante Schelfbohrung mit dem russischen Bohrschiff „Kimberlit“ musste aufgrund von extrem widrigen Eisbedingungen Ende August kurzfristig auf den Sommer 2005 verschoben werden. Doch auch Ende August 2005 waren die Eisverhältnisse in der Wilkizkij-Straße derart schwierig, dass der „Kimberlit“ die Genehmigung zur Durchfahrt trotz Eisbrecherbegleitung nicht erteilt wurde. Zwar ist generell in der Arktis während der letzten Jahre und Jahrzehnte eine Abnahme der Meereisdicke sowie der Meereisbedeckung zu verzeichnen, jedoch zeigten die Eisbeobachtungen in den Sommern 2003, 2004 und 2005, dass es regional immer wieder zu außergewöhnlich hohen Meereiskonzentrationen kommen kann (Abb. 5). So hat es solch schwierige Eisbedingungen wie im Sommer 2004 östlich der Straße von Wilkizkij seit Beginn der Aufzeichnungen nicht gegeben.

Gemeinsam mit den Stipendiaten des OSL wurden ein nationales (8.7.2003 am IFM-GEOMAR) und zwei bilaterale Arbeitstreffen (2.-4.12.2004 am IFM-GEOMAR, 7.-9.2.2006 am OSL) durchgeführt. In enger Zusammenarbeit mit dem OSL unterstützte die AG 8 außerdem logistisch die Vorbereitung und Durchführung des 9. bilateralen Arbeitstreffens im Rahmen der deutsch-russischen Fachvereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet

der Meeres- und Polarforschung am 15.-16. Dezember 2003 in der Außenstelle des AWI auf Helgoland sowie des 10. bilateralen Arbeitstreffens am 6.-7. Februar 2006 am OSL in St. Petersburg.

Insgesamt wurden 36 Aufenthalte von Gastwissenschaftlern von dreizehn Institutionen (LDR, St. Petersburg State University of the Means of Communication, SPbU, VNIIO, MSU, PIY, AARI, Tyumen Gas and Oil University, Institute of Microbiology RAS, Institute of Microbiology and Virology in Almaty, Hydrobase Tiksi, Institute of Physico-Chemical Problems in Soil Science in Pushchino, SIO) an deutschen Partnerinstitutionen organisiert und trugen wesentlich zur Auswertung der Ergebnisse bei (s. Anhang).

In über 250 nationalen und internationalen Veröffentlichungen sowie in fast 500 Tagungsbeiträgen stellten die WissenschaftlerInnen ihre Forschungsergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit vor (s. Anhang). Hervorzuheben ist dabei insbesondere der Sonderband über die Ergebnisse des Verbundes „Arctic shelf environments: past and present of the Laptev Sea“ in der Zeitschrift „Global and Planetary Change“ (Bauch and Kassens, 2005; s. Liste der Veröffentlichungen im Anhang).

Ein besonderes Anliegen des Verbundvorhabens war die Einbindung von Nachwuchswissenschaftlern in die Forschungsarbeiten. So ist es gelungen, neun Dissertationen und siebzehn Diplomarbeiten im Rahmen des Verbundes abzuschließen (s. Anhang). Der Erfolg des Vorhabens zeigt sich auch in den insgesamt sechzehn Ehrungen und Auszeichnungen, die an Mitglieder des Verbundes verliehen wurden (s. Anlage).

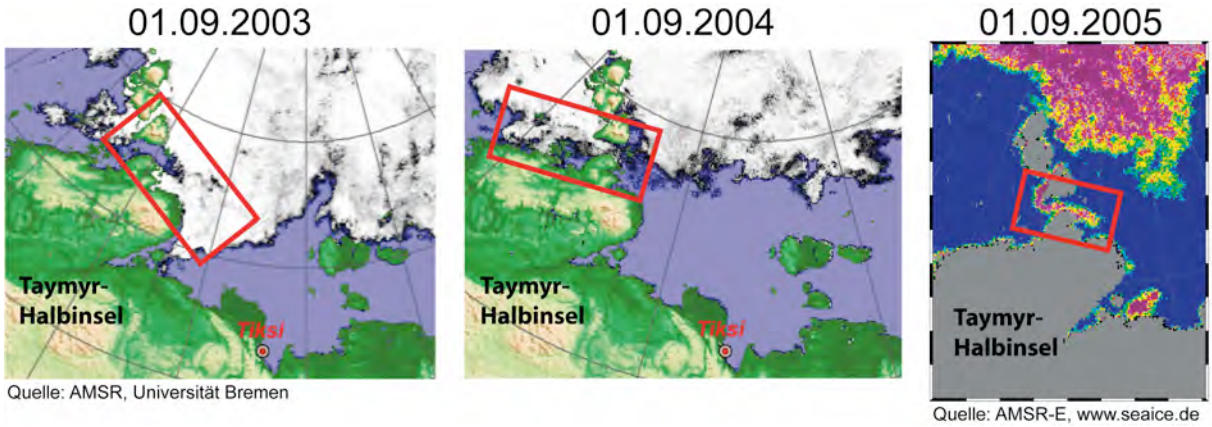

Abb. 5: Vergleich der Meereiskonzentration in der westlichen Laptev-See am 1. September 2003, 2004 und 2005. Die Straße von Wilkizkij ist durch einen roten Rahmen gekennzeichnet.

Da sich zum Ende der Projektlaufzeit kurzfristig die Möglichkeit ergab, Zugriff auf alte russische Umweltdatensätze über die Laptev-See aus den Jahren 1982 bis 1996 zu bekommen, die für historische Vergleiche mit den Ergebnissen des Verbundvorhabens von großem

wissenschaftlichem Interesse waren, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Verbundvorhabens bis zum 31. August 2006 bewilligt.

Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Der terrestrische Permafrost im Hinterland der Laptev-See, seine Verbreitung und seine Stabilitätsgrenzen waren zu Projektbeginn durch zahlreiche Studien bereits gut erforscht. Das Wissen um den submarinen Permafrost in der Laptev-See hingegen beruhte lediglich auf den Ergebnissen russischer Explorationsbohrungen in den 70er und 80er Jahren bei den Neusibirischen Inseln (Grigoriev, 1993; Kunitsky, 1989) und der wissenschaftlichen Pilot-Bohrexpedition TRANSDRIFT VIII in der zentralen Laptev-See (Kassens et al., 2001). Gemäß diesen Daten erstrecken sich kontinuierliche, bis zu 1000 m mächtige Permafrostabfolgen über das gesamte Schelfgebiet der Laptev-See. Gefrorene, mit Eiskristallen durchsetzte Sedimente treten bereits wenige Zentimeter unter der Meeresbodenoberfläche auf (Kassens et al., 1998). Die Wechselwirkungen zwischen den gefrorenen Meeresbodensedimenten und der Wassersäule waren jedoch nur wenig erforscht (Danilov, 2000), obwohl Modelle zeigten, dass in und unterhalb dieser Permafrostabfolgen eingeschlossene Treibhausgase bei ihrer Freisetzung z. B. in Folge von globalen Meeresspiegel- und Temperaturveränderungen drastische Auswirken auf das globale Umweltsystem haben können (Hutter and Straughan, 1999).

Trotz intensiver Bemühungen waren Prognosen und Abschätzungen zur Entwicklung der Treibhausgasgfreisetzung im Permafrost immer noch strittig. Durch Feldmessungen gestützte Hochrechnungen und Modellierungen konzentrierten sich vor allem in Alaska und Skandinavien, während für Kanada und Sibirien nur wenige regionale Untersuchungen vorlagen (zusammengestellt in Kutzbach, 2005).

Die zeitliche und räumliche Variabilität der Permafrostmächtigkeit und -verteilung in der Laptev-See ist eng an die globalen Klimazyklen des Quartärs gekoppelt. Da die Region kaum vergletschert war, konnte im Zuge der marinen Regressionen während der Kaltzeiten auf den trockenliegenden Schelfen terrestrischer Permafrost entstehen. Während der Warmzeiten dagegen kam es durch Transgression zur Überflutung des Schelfs. Damit gerieten die küstennahen, terrestrischen Permafrostabfolgen unter marinen Einfluss. Die mit der Überflutung einhergehenden Prozesse, die zur Degradation des nunmehr submarinen Permafrostes führen, waren allerdings kaum verstanden. Es wurde angenommen, dass neben der Temperatur und dem geokryologischen Aufbau der Sedimente insbesondere der Salzgehalt im Porenraum eine entscheidende Rolle spielt, worauf Untersuchungen von Baker und Osterkamp (1988, 1989),

Gosink und Baker (1990) und Osterkamp et al. (1989) hindeuteten. Ansätze zur Modellierung dieses Auftauphänomens wurden von Hutter und Straughan (1999) beschrieben. Untersuchungen über die Wechselwirkungen zwischen dem hydrodynamischen Regime und dem Permafrost bezogen sich jedoch vor allem auf die Beschreibung der Prozesse im Bereich von Thermokarstküsten (Taylor and Allen, 1987; Osterkamp et al., 1989; Ruz et al., 1992; Hill and Solomon, 1999).

Einige russische Autoren haben in den siebziger Jahren an submarinem Permafrost und Salinitätsprofilen gearbeitet, z. B. Vigdorchik (1980) und Molochushkin und Gavrilev (1982). Die Ergebnisse konnten zwar als Anhaltspunkte genutzt werden, waren allerdings überholt und aufgrund fehlender Positionsangaben nicht nachzuvollziehen.

Bohrungen im küstennahen Permafrost wurden in Alaska (Blouin et al., 1979; Neave and Sellmann, 1982; Sellmann et al., 1989) und in der kanadischen Arktis (Dallimore, 1986, 1991; Kurfurst, 1988) durchgeführt. Der Schwerpunkt der Programme lag allerdings auf geotechnischen Aspekten, die Porenwassergeochemie wurde nicht hinreichend untersucht. Außerdem sind die Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf den wesentlich eisreicheren sibirischen Permafrost übertragbar.

Oberflächennahe Sedimentabfolgen aus der sibirischen Arktis wurden mit spezieller Berücksichtigung der Permafrostverteilung von Kim et al. (1999) kartiert. Die hochauflösenden seismischen Sparkerprofile zeigen in den obersten ~200 ms eine Aufteilung in vier seismostratigraphische Einheiten, die jeweils durch markante Reflektoren charakterisiert sind. Eine genaue Zuordnung zu massivem Permafrost, partiellem Permafrost oder Aufschmelzungszonen wurde aber nicht vorgenommen, da die einkanalseismischen Daten keine hinreichend auffälligen Signaturen aufwiesen und Geschwindigkeiten nicht ermittelt werden konnten.

Ein weiterer seismoakustischer Datensatz aus der Laptev-See wurde mit FS „Polarstern“ während der TRANSDRIFT-V-Expedition gewonnen. Mit dem hochfrequenten (4 kHz) PARASOUND-Echolot konnte jedoch nur eine begrenzte Signaleindringung erreicht werden, so dass allenfalls die Oberkante des Permafrostes erfasst wurde. Kleiber et al. (2001) nehmen eine sedimentfazielle Einordnung des Kontinentalhanges der Laptev-See anhand von Echotypen vor, die eine klare Zuordnung zu Meeresspiegelschwankungen und Sequenzgrenzen erlaubt. Besonders Kleiber und Niessen (1999) weisen darüber hinaus bei ihren Untersuchungen von Paläokanälen in der Nähe der Schelfkante darauf hin, dass der transparente Charakter der tieferen Stockwerke und ein auffälliger Reflektor in 2 bis 20 m Teufe auf eine großflächige Verteilung von Permafrost hindeuten könnte. Allerdings konnten sie keine interne Signatur

ermitteln, so dass für eine weitere Präzisierung der Einsatz niedriger Frequenzen und die seismische Methode erforderlich waren.

Eine ausführliche Darstellung des wissenschaftlichen Standes bei Projektbeginn ist in den Berichten der Arbeitsgruppen dargestellt.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Organisation und Durchführung der Expeditionen und der Arbeitstreffen sowie die Erhebung und Auswertung der Daten erfolgten in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit dem russischen Forschungsprojekt „System Laptev-See“ (finanziert durch das russische Ministerium für Bildung und Wissenschaft) und den Forschungsarbeiten im Rahmen des BMBF-Vorhabens „Umweltsysteme im Umbruch – Stipendienprogramm des Otto-Schmidt-Labors für Polar- und Meeresforschung (OSL)“. Hervorzuheben ist dabei die Einbindung von Studierenden des Masterstudienganges für angewandte Meeres- und Polarforschung POMOR in die Forschungsarbeiten des Verbundes (s. Diplomarbeiten unter „Relevante Veröffentlichungen der ProjektmitarbeiteInnen“ im Anhang). Eine besonders enge Kooperation bestand zu den in Tabelle 2 aufgeführten Partnern.

Tab. 2: Die wichtigsten nationalen und internationalen Kooperationspartner der einzelnen Arbeitsgruppen

Arbeitsgruppe 1	Adresse	AnsprechpartnerIn
Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie	Celsiusstr. 1, 28359 Bremen, Germany	Neretin L.
TU München	Arcisstr. 21, 80333 München, Germany	Wagner M.
Universität Osnabrück	Neuer Graben/Schloss, 49069 Osnabrück, Germany	Lipski A.
Permafrost Institute SB RAS	677018 Yakutsk, 18, Merzlotnaya, 1, Russia	Grigoriev M. Kurchatova A.
Institute of Microbiology of RAS	117811 Moscow, Prospect 60, Letja Oktjabrja 7, Russia	Lebedeva E.
Lena Delta Reserve	678400 Tiksi, Ul. Akademika Fedorova, 28, Russia	Abramova E.
State Research Center – Arctic and Antarctic Research Institute	199397 St. Petersburg, Ul. Beringa, 38, Russia	Bolshiyanov D.
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Dubinina G. Sorokin D.

Tab. 2: Fortsetzung

Arbeitsgruppe 2	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
ICBM Universität Oldenburg	Carl-von-Ossietzky-Str. 9-11 26111 Oldenburg, Germany	Brumsack H.J. Schnetger B.
Permafrost Institute SB RAS	677018 Yakutsk, 18, Merzlotnaya, 1, Russia	Grigoriev M.
Moscow Lomonosov State University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Romanovskii N.
St. Petersburg State University of the Means of Communication	190031 St. Petersburg, Moscovsky pr., 9, Russia	Are F.
University of Oslo	Blindern, 0316 Oslo, Norway	Sollid J.L.
Earth Cryosphere Institute	119991 Moscow, Vavilov pr. 30/6, Russia	Drozdov D.S.
P.P. Shirshov Institute for Oceanology	117851 Moscow, 23 Krasikova, Russia	Pavlidis J.A.
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Streletskaya I.
Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science	142292 Pushchino, ul. Institutskaya 2, Russia	Ostroumov V.E.
Institute of the Cryoshpere of the Earth RAS	117312 Moscow, Ul. Fersmana 11, Russia	Vasiliev A.
VNIIOkeangeologia	190121 St. Petersburg, Angliysky pr., 1, Russia	Cherkashev G.
International Permafrost Association	P.O.Box 7, Woodshole, Massachusetts 02543, USA	Brown J.
Geological Survey of Canada	1 Challenger Drive, P.O.Box 1006, Dartmouth, Nova Scotia B2Y4A2, Canada	Solomon S.
Arbeitsgruppe 3	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben	Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany	Frechen M.
Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung	Christian-Albrechts-Universität, 24098 Kiel, Germany	Grootes P.M. Erlenkeuser H.
VNIIOkeangeologia	190121 St. Petersburg, Angliysky pr., 1, Russia	Drachev, S.
Arbeitsgruppe 4	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Romanovskii N.
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany	Delisle G.

Tab. 2: Fortsetzung

Arbeitsgruppe 5	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
Leibniz-Labor für Altersbestimmung und Isotopenforschung	Christian-Albrechts-Universität, 24098 Kiel, Germany	Grootes P.M., Erlenkeuser H.
Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben	Stilleweg 2, 30655 Hannover, Germany	Frechen M.
Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg	Im Neuenheimer Feld 366, 69120 Heidelberg, Germany	Mangini A.
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Polyakova Ye.
Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS	117071, Moscow, Leninsky pr., 33, Russia	Sher A. Naidina O.
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Taldenkova E.
Arbeitsgruppe 6	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung	Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Germany	Niessen F. Jokat W.
VNIIOkeangeologia	190121 St. Petersburg, Angliysky pr., 1, Russia	Drachev, S. Rekant P. Gusev E.
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung	Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven, Germany	Haas C.
Coastal Research Laboratory, CAU, Kiel	Otto-Hahn-Platz 3, 24118 Kiel, Germany	Poerbandono
Arbeitsgruppe 7	**Adresse**	**AnsprechpartnerIn**
Nautilus Marine Service, Bremen	Haferwende 3, 28357 Bremen, Germany	Abich G.
Institut für Geowissenschaften, Hamburg	Bundesstraße 55, 20146 Hamburg, Germany	Gaye-Haake B.
Institut für Küstenforschung	Max-Planck-Straße, 21502 Geesthacht, Germany	Puls W. Prange A. Pleskatchevski A.
State Research Center – Arctic and Antarctic Research Institute	199397 St. Petersburg, Ul. Beringa, 38, Russia	Timokhov L. Kulakov M.Y Kirillov S. Berezovskaya S.
Moscow State Lomonosov University	119899 Moscow, Vorobyovy Gory, Russia	Romanovskii N.
Lena Delta Reserve	678400 Tiksi, Ul. Akademika Fedorova, 28, Russia	Abramova E. Gukov A.
St. Petersburg State University of the Means of Communication	190031 St. Petersburg, Moscovsky pr, 9, Russia	Are F.
VNIIOkeangeologia	190121 St. Petersburg, Angliysky pr., 1, Russia	Cherkashev G.
International Arctic Research Center University of Alaska	P.O.Box 757320, Fairbanks AK 99775-7320, USA	Dmitrenko I.
University of Oslo	Blindern, 0316 Oslo, Norway	Etzelmüller B.

Tab. 2: Fortsetzung

Arbeitsgruppe 8	Adresse	AnsprechpartnerIn
State Research Center - Arctic and Antarctic Research Institute	199397 St. Petersburg, Ul. Beringa, 38, Russia	Timokhov L. Pryamikov S. Churun V. Bolshiyanov D.
Permafrost Institute SB RAS	677018 Yakutsk, 18, Merzlotnaya, 1, Russia	Grigoriev M.
Hydrobase Tiksi	678400 Tiksi, Ul. Akademika Fedorova, 28, Russia	Melnichenko D.
Lena Delta Reserve	678400 Tiksi, Ul. Akademika Fedorova, 28, Russia	Abramova E. Gukov, A.
VNIIOkeangeologia	190121 St. Petersburg, Angliysky pr., 1, Russia	Drachev S. Cherkashev G. Grikurov G. Miloradovskaya E. Rekant P.

Literatur

ACIA (2004) Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 139 pp.

Baker, G.C. and Osterkamp, T.E. (1988) Implications of salt fingering processes for salt movement in thawed coarse -grained subsea permafrost. Cold Region Science Technology, 15: pp. 45-52.

Baker, G.C. and Osterkamp, T.E. (1989) Salt redistribution during freezing of saline sand columns at constant rates. Water Resources Research, 25: pp. 1825-1831.

Bauch, H.A. and Kassens, H. (eds.) (2005) Arctic Siberian Shelf Environments. Global and Planetary Change, Special Issue, 252 pp.

Blouin, S.E., Chamberlain, E.J., Sellmann, P.V. and Garfield, D.E. (1979) Penetration tests in subsea permafrost, Prudhoe Bay, Alaska. CRREL Report, 79-7, 45 pp.

Dallimore, S.R. (1986) Geotechnical investigations of the near- shore zone, North Head, Richards Island, N.W.T. Geological Survey of Canada Open File, 1376, 82 pp.

Dallimore, S.R. (ed.) (1991) Geological, geotechnical and geophysical studies along an onshore-offshore transect of the Beaufort Shelf. Geological Survey of Canada Open File, 2408, 325 pp.

Danilov, I.D. (2000) Submarine permafrost of the arctic shelf and related processes of cryogenic lithomorphogenesis. Oceanology, 40 (5): pp. 714-722.

Gosink, J.P. and Baker, G.C. (1990) Salt fingering in subsea permafrost: some stability and energy considerations. Journal of Geophysical Research, 95 (C6): pp. 9575-9583.

Grigoriev, M.N. (1993) Cryomorphogenesis of the Lena River Mouth Area. SB RAS: Yakutsk, 176 pp. (in Russian).

Hill, P.R. and Solomon, S. (1999) Geomorphologic and sedimentary evolution of a transgressive thermokarst coast, Mackenzie delta region, Canadian Beaufort Sea. Journal of Coastal Research, 15 (4): pp. 1011-1029.

Hutter, K. and Straughan, B. (1999) Models of convection in thawing porous media in support for the subsea permafrost equations. Journal Geophysical Research, 102: pp. 29249-29260.

Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I., Drachev, S., Grikurov, G., Thiede, J. and Tuschling, K. (2001) TRANSDRIFT VIII: Drilling in the Laptev Sea 2000. The Nansen Icebreaker, 12 (1): pp. 7-9.

Kassens, H., Dmitrenko, I., Rachold, V., Thiede, J. and Timokhov, L. (1998) Russian and German scientists explore the Arctic's Laptev Sea and its climate system. EOS, 79 (27): pp.

317, 322-323.

Kim, B., Grikurov, G. and Soloviev, V. (1999) High resolution seismic studies in the Laptev Sea shelf: First results and future needs. In: Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I.A., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J. and Timokhov, L.A. (eds.). Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer, pp. 683-692.

Kleiber, H.P. and Niessen, F. (1999) Late Pleistocene paleoriver channels on the Laptev Sea shelf – implications from sub-bottom profiling. In: Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I.A., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J. and Timokhov, L.A. (eds.). Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer, pp. 657-665.

Kleiber, H.P., Niessen, F. and Weiel, D. (2001) The Late Quaternary evolution of the western Laptev Sea continental margin, Arctic Siberia - implication from sub-bottom profiling. Global and Planetary Change, 31 (1-4): pp. 105-124.

Kunitsky, V.V. (1989) Cryolithology in the Lena River Mouth. Permafrost Institute Press: Yakutsk, 162 pp. (in Russian).

Kurfurst, P.J. (1988) Geotechnical investigations off northern Richards Island, N.W.T. - 1987. Geological Survey of Canada Open File, 1707, 147 pp.

Kutzbach, L. (2005) The exchange of energy, water and carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River delta, Northern Siberia. Dissertation. University of Hamburg, 125 pp.

Molochushkin, E.N. and Gavrilev, R.I. (1982) Structure, phase composition and heat regime of the bottom of the coastal Laptev Sea. In: Tolmachev, A.I. (ed.) The Arctic Ocean and Its Coast in the Cenozoic Era, Amerind Publishing: New Delhi, pp. 503-509.

Neave, K.G. and Sellmann, P.V. (1982) Subsea permafrost in Harrison Bay, Alaska; an interpretation from seismic data. CRREL Report, 82-24, 62 pp.

Osterkamp, T.E., Baker, G.C., Harrison, W.D. and Matava, T. (1989) Characteristics of the active layer and shallow subsea permafrost. Journal of Geophysical Research, 94 (C11): pp. 16,227-16,236.

Ruz, M.-H., Héquette, A. and Hill, P.R. (1992) A model of coastal evolution in transgressed thermokarst topography, Canadian Beaufort Sea. Marine Geology, 106: pp. 251-278.

Sellmann, P.V., Reimnitz, E. and Kempema, E.W. (1989) Seafloor temperature and conductivity data from coastal waters of the U.S. Beaufort Sea. CRREL Report, 89-1, 19 pp.

Taylor, A.E. and Allen, V. (1987) Shallow temperature perturbations and sediment thermal conductivities, Canadian Beaufort shelf. Canadian Journal of Earth Sciences, 24: pp. 2223-2234.

Vigdorchik, E. (1980) Arctic Pleistocene History and the Development of Submarine Permafrost. Westview Press: Boulder Co., 250 pp.

II. SCHLUSSBERICHT – EINGEHENDE DARSTELLUNG

AG 1: Mikrobiell gesteuerte Prozesse im Permafrost

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Die geomikrobiologischen Arbeiten konzentrierten sich auf terrestrische Permafrostsequenzen am Kap „Mamontovy Klyk“, in der westlichen Laptev-See und am Referenzstandort Samoylov, südliches Lena-Delta. Ergänzend wurden verschiedenartige Böden der Auftauschicht an diesen beiden Standorten untersucht. Die geplanten mikrobiologischen Analysen der Küstensedimente aus der COAST-I-Bohrung sollen mit Eigenmitteln und zusätzlich beantragten Drittmitteln nach Ablauf des Verbundvorhabens in Zusammenarbeit mit den beteiligten Verbundpartnern im Jahr 2006 erfolgen. Die mikrobiologischen Arbeiten gliedern sich in drei Teilbereiche: 1. Studien zur Methanbildung, 2. Analysen zur Methanoxidation und 3. Untersuchungen zu Stickstoffumsätzen im Permafrost.

Anaerober mikrobieller Kohlenstoffumsatz (Methanogenese)

Im Mittelpunkt der Studie (durchgeführt von D. Wagner und S. Liebner, AWI Potsdam) standen die Untersuchung des anaeroben mikrobiellen Umsatzes von organischem Kohlenstoff im Zuge der Methanogenese (Methanbildung) und die Frage, was mit dem im Permafrost gespeicherten Kohlenstoff bei sich ändernden Umweltbedingungen geschieht. Dazu wurden vergleichende Untersuchungen zur Stoffwechselaktivität und Biodiversität der methanbildenden Mikroorganismen (methanogene Archaeen) mit verschiedenen Permafrostböden und -sedimenten von der Insel Samoylov (72° N, 126° E) und vom Kap „Mamontovy Klyk“ (73°N, 117°E) durchgeführt.

Die Langzeitstudien zur Methanfreisetzung im Lena-Delta zeigten, dass für die typische Landschaftsform der Low-center-Polygone die Emission aus den feuchten Polygonzentren etwa zehnmal so hoch ist wie von den trockeneren Polygonwällen. Die Unterschiede auf der Ökosystemskala konnten auf die unterschiedliche Aktivität der an den Methanflüssen beteiligten Mikroorganismengemeinschaften zurückgeführt werden (Wagner et al., 2003).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden vergleichende Untersuchungen zur Aktivität der methanogenen Archaeen in der aktiven Auftauzone verschiedener Böden (active layer) in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Substrat durchgeführt. Diese Studien zeigten, dass

die Methanbildung mit höheren Temperaturen (zwischen 4°C und 18°C) und nach Zugabe von methanogenen Substraten (z. B. Methanol, Wasserstoff) zum Teil deutlich anstieg. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei einem klimabedingten Temperaturanstieg im „active layer" der Umsatz der organischen Bodensubstanz und die Aktivität der methanogenen Archaeen ebenfalls ansteigen werden. Die Folge wäre eine stärkere Methanbildung, was letztlich sehr wahrscheinlich zu einer stärkeren Methanemission führen würde.

Um diese Zusammenhänge weiter aufzuklären, wurden die Diversität und Abundanz der am Kohlenstoffumsatz beteiligten Mikroorganismen, insbesondere der methanogenen Archaeen, mit Hilfe der Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) und durch DNA-basierte Analysen (DGGE) untersucht. Dabei lagen die Zellzahlen (Größenordnung 10^8 Zellen g^{-1} Boden) und die Diversität der methanogenen Archaeen im „active layer" ähnlich hoch wie in Böden gemäßigter Breiten (Kobabe et al., 2004; Ganzert, 2005). Weiterhin wurden Phosphoetherlipide (PLEL) als Biomarker für methanogene Archaeen genutzt. Es konnte gezeigt werden, dass ein signifikanter Zusammenhang sowohl zwischen den PLEL und der Zellzahl methanogener Archaeen besteht als auch zwischen den PLEL und der potentiellen Aktivität der Organismen (Wagner et al., 2005). Damit haben sich die Phosphoetherlipid-Untersuchungen als geeignete Methode für die Lokalisierung methanogener Archaeen und potentieller Zonen der Methanogenese im Permafrost erwiesen. Die ersten Untersuchungen an holozänen und spätpleistozänen Bohrkernen zeigten mit bis zu 500 nmol CH_4 g^{-1} Sediment zum Teil sehr hohe Methankonzentrationen. Durch die Anwendung der Phosphoetherlipiduntersuchungen an den gefrorenen Sedimenten konnte erstmals ein Zusammenhang zwischen dem Methangehalt und dem Vorhandensein methanogener Archaeen aufgezeigt werden. Die Vermutung liegt nahe, dass die Mikroorganismen in den gefrorenen Sedimenten stoffwechselaktiv sind. Diese Hypothese konnte durch Aktivitätsexperimente bei Minustemperaturen (bis -6 °C) und mit markierten Substraten (^{13}C-Acetat, ^{13}C-Methanol und ^{13}C-CO_2) bestätigt werden. Die Studien zur Permafrostdynamik und zur Bedeutung der mikrobiellen Gemeinschaften für den Kohlenstoffumsatz werden an den Bohrkernen vom Küstentransekt COAST I vom Alfred-Wegener-Institut über das Projektende hinaus fortgeführt.

Prozesse der Methanreduktion im Permafrost (Methanoxidation)

Ziel dieses Teilbereiches (durchgeführt von U. Zimmermann, C. Fiencke, C. Knoblauch und E.-M. Pfeiffer, Universität Hamburg) ist die Kenntnis grundlegender Mechanismen der mikrobiell gesteuerten Methanoxidation im Permafrost und ihrer Übertragbarkeit und

Anwendbarkeit für Strategien zur Methanreduktion, z. B. bei der Erdgasgewinnung, bei Monitoring-Programmen der Gasindustrie u. a. Da bisher keine Daten zur Methanoxidation im Permafrost vorliegen, mussten zunächst Grundlagenuntersuchungen zu den beteiligten Bodenorganismen begonnen werden.

Zur Bestimmung von Größe und Struktur der methanoxidierenden Lebensgemeinschaften wurden Phospholipid-Fettsäure (PLFA)-Analysen eingesetzt. Über eine Kombination dieser Methode mit $^{13}CH_4$-Markierungsexperimenten wurden darüber hinaus die aktiv am Methanumsatz beteiligten Organismen detektiert. Potentielle Aktivitäten der Methanoxidanten wurden in Labor-Inkubationsversuchen bestimmt. In allen untersuchten permafrostbeeinflussten Habitaten konnten aktive oder ruhende methanoxidierende Bakterien nachgewiesen werden. Höchste Aktivitäten und Populationsgrößen wurden in den Oberböden von vermoorten Standorten der sommerlichen Auftauschicht gefunden. Die PLFA-Biomarker im Boden sind hier zu 1,5 bis 4,5% spezifisch für Methanoxidanten. Daraus kann abgeleitet werden, dass diese Organismen 4 bis 14% der gesamten bakteriellen Biomasse bilden. Die gesamte Bakterienbiomasse und der Anteil der Methanoxidanten sind hier ähnlich hoch wie an vergleichbaren Standorten wärmerer Klimate. Inaktive methanoxidierende Bakterien in der Auftauschicht wurden in Zonen gefunden, in denen eines der Substrate Sauerstoff oder Methan fehlte. Hier machen die Methanoxidanten noch 0,5 bis 2% der gesamten bakteriellen Biomasse aus. Diese ruhenden Organismen konnten nach Zugabe von Sauerstoff und Methan reaktiviert werden.

Methanoxidierer aus seit 1.000 bis mehreren 10.000 Jahren gefrorenen Sedimenten waren nach dem Auftauen des Materials und einer Vorinkubationsperiode aktiv. Diese verzögerte Aktivität lässt darauf schließen, dass die Organismen im ständig gefrorenen Habitat in einem inaktiven Zustand ohne Methanumsatz überleben. Die Reaktivierung war schon bei 0°C möglich, verlief bei steigenden Temperaturen jedoch schneller. Nährstoffzugaben verkürzten die Reaktivierungsphase ebenfalls erheblich, dennoch gelang die Reaktivierung auch ohne zusätzliche Nährstoffe. Die über PLFA-Analysen ermittelten Populationsgrößen in den ständig gefrorenen Sedimenten sind denen in inaktiven Zonen der Auftauschicht ähnlich.

Über Markierungsexperimente mit ^{13}C-angereichertem Methan und gekoppelten PLFA-Analysen konnte gezeigt werden, dass in allen untersuchten Böden und ständig gefrorenen Sedimenten die Gruppe so genannter „Typ-I"-Methanoxidanten über „Typ II" dominierte. In Feuchtgebietsböden wärmerer Klimate existieren die beiden Gruppen meist mit ähnlichen

Populationsanteilen nebeneinander. Dies deutet auf eine schlechtere Anpassung der Typ-II-Organismen an die Bedingungen in den permafrostbeeinflussten Habitaten hin.

Verschiedenartige Standorte und Tiefenlagen der Auftauschicht zeigten übereinstimmend maximale Methanoxidationsraten bei ca. 25°C. Die Anpassung an niedrige Temperaturen variierte dagegen deutlich. Die Population eines Bodens erreichte bei 0°C noch 30% ihrer Maximalaktivität – im Gegensatz zu den übrigen Böden mit 9% oder weniger. In Langzeitinkubationen mit nachfolgenden $^{13}CH_4$-Markierungen und ^{13}C-PLFA-Analysen konnte nachgewiesen werden, dass die Temperatur nicht nur die Aktivität, sondern auch die Populationsstruktur der methanoxidierenden Bakterien beeinflusst. Nach Inkubation bei 0°C dominierte weiterhin Typ I, wie unter In-situ-Bedingungen. Bei 22°C hingegen waren Typ I und II annähernd gleich bedeutend.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die methanoxidierenden Lebensgemeinschaften im Permafrost an veränderte Umweltbedingungen durch Änderung der Zusammensetzung, Größe und Aktivität ihrer Populationen anpassen können. Bei günstigem Substratangebot sind die methanoxidierenden Gemeinschaften in der Auftauschicht ähnlich groß wie in wärmeren Klimaten, jedoch mit anderer Populationszusammensetzung.

Stickstoffumsätze im Permafrost (N-Flüsse)

Ziel der N-Arbeitsgruppe (M. Alawi und E. Spieck, Universität Hamburg) war es, die Diversität und Anpassungspotentiale von stickstoffumsetzenden Bakterien im Hinblick auf die Umwandlung von terrestrischem in submarinen Permafrost zu analysieren. Um die Prozesse des N-Kreislaufs zu quantifizieren, wurden die mikrobiologischen Untersuchungen der in den Jahren 2003-2005 gewonnenen Anreicherungskulturen von nitrifizierenden Bakterien aus Permafrostböden bzw. marinen Sedimenten fortgeführt. Zahlreiche neue Arten von Nitritoxidanten der Gattungen *Nitrospira* und *Nitrobacter* konnten identifiziert und abstammungsgeschichtlich eingeordnet werden. Um Vertreter einzelner Gruppen molekularbiologisch nachzuweisen, wurden spezifische Primer entwickelt und die Nachweis-Methodik angepasst. Mit Hilfe der molekularbiologischen TGGE-Technik (Temperatur-Gradienten-Gelelektrophorese) sowie mittels Fettsäureanalysen konnte eine Verschiebung der nitritoxidierenden Bakterienpopulation in Abhängigkeit von der Inkubationstemperatur nachgewiesen werden. Während von 17-28°C Vertreter von *Nitrospira* und *Nitrobacter* vorkamen, dominierten bei Anreicherungstemperaturen von 4 und 10°C Nitritoxidanten einer bislang unbekannten Gruppe. Diese psychrotrophen Organismen gehören phylogenetisch, wie keine der bekannten

Gattungen der Nitritoxidanten, zu den *Betaproteobakterien*. Nahe verwandte Bakterien scheinen auch in gemäßigten Zonen eine große ökologische Bedeutung zu haben. Im Rahmen eines DAAD-Austauschprogrammes (Maria Klimova) wurden diese neuen Nitrifikanten näher charakterisiert und mit mesophilen bzw. moderat thermophilen Nitritoxidanten verglichen. Deutlich ist, dass die neu entdeckten Organismen von Samoylov im Gegensatz zu den bekannten Vertretern kein Wachstum mehr bei 28°C zeigten und an sehr niedrige Substratkonzentrationen angepasst sind.

Im Sommer 2005 wurde erneut ein rezenter Tundraboden auf Samoylov in verschiedenen Tiefen beprobt, um die Quantifizierungen (bei 10 und 22°C) und Aktivitätsmessungen (bei 17°C) von nitrifizierenden Bakterien aus den vergangenen Jahren zu wiederholen. Es hat sich bestätigt, dass aktive Ammoniak- und Nitritoxidanten weit verbreitet sind, wobei das Wachstum bei 22°C schneller ist als bei 10°C. In Oberflächenproben mit einem hohen Gehalt an organischen Substanzen konnten überwiegend denitrifizierende Prozesse beobachtet werden, während die lithoautotrophe Nitrifikation in tieferen Schichten bis 40 cm vorherrschte. Dort könnten aerobe Mikro-Nischen die Aktivitäten der Nitrifikanten in den ansonsten wassergesättigten Böden aufrechterhalten. Weiterführende Diversitätsstudien an kälteliebenden Ammoniak- und Nitritoxidanten werden im Laufe zweier Diplomarbeiten durchgeführt.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse über den Stickstoffumsatz im Permafrost werden bereits eingesetzt, um die bis vor kurzem als „nicht-kultivierbar“ geltenden Nitritoxidanten der Gattung *Nitrospira* aus Belebtschlamm zu isolieren. Wie anhand von Bodenproben aus Samoylov festgestellt wurde, nimmt der Anteil der Begleitorganismen (u. a. Denitrifikanten) in nitritoxidierenden Anreicherungskulturen ab, wenn die Inkubationstemperatur von üblicherweise 28°C auf 10°C abgesenkt wird. Reinkulturen der Gattung *Nitrospira* sind wichtig, um verbesserte Kenntnisse über die Wachstumsbedingungen dieser Schlüsselorganismen zu erlangen. Diese können helfen, Leistungseinbrüche bei der Abwasserreinigung zu vermeiden und die Nitrifikation in kommunalen und industriellen Kläranlagen zu optimieren. Da sich diese nitritoxidierenden Bakterien auch in Trinkwasserversorgungssystemen ansiedeln und sie in kontaminiertem Grundwasser nachgewiesen wurden, ist ihr Vorkommen von allgemeinem Interesse. Von Seiten wassertechnischer Firmen besteht Bedarf, kälteliebende nitritoxidierende Bakterien einzusetzen, um toxisches Nitrit aus z. B. Mineralwasser mittels biologischer

Oxidation zu entfernen. Dafür sind Reinkulturen essentiell, die sowohl aus Belebtschlamm als auch aus Permafrostböden stammen können.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine neuen, die Durchführungen des Vorhabens beeinflussenden FE-Ergebnisse bekannt geworden.

Literatur

Ganzert, L. (2005) Biodiversität methanogener Archaeen in arktischen Böden des Lena-Delta/Sibirien. Diploma thesis. University of Potsdam, 89 pp.

Kobabe, S., Wagner, D. and Pfeiffer, E.-M. (2004) Characterization of microbial community composition of a Siberian tundra soil by fluorescence in situ hybridization. FEMS Microbiol. Ecol., 50: pp. 13-23.

Wagner, D., Kobabe, S., Pfeiffer, E.-M. and Hubberten, H.-W. (2003) Microbial controls on methane fluxes from a polygonal tundra of the Lena Delta, Siberia. Permafrost and Periglacial Processes, 14: pp. 173-185.

Wagner, D., Lipski, A., Embacher, A. and Gattinger, A. (2005) Methane fluxes in extreme permafrost habitats of the Lena Delta: effects of microbial community structure and organic matter quality. Environmental Microbiology, 7: pp. 1582-1592.

AG 2: Geochemische Prozesse beim Versinken des Landpermafrostes

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Da der Küstenbohrtransekt COAST I den zentralen Teil des Vorhabens bildete und das von den Verbundpartnern in der östlichen Laptev-See geplante Bohrprogramm nicht stattfinden konnte, konzentriert sich die Berichterstattung im Wesentlichen auf die Durchführung des Bohrtransektes und dessen Ergebnisse. Da die Bohrkampagne erst ein Jahr später als geplant stattfinden konnte, ist die Bearbeitung des gewonnenen Materials noch nicht vollständig abgeschlossen. Allerdings liegen bereits eine Vielzahl von Daten und interessanten Ergebnissen vor, die im Folgenden vorgestellt werden.

Abbildung 6 zeigt das auf dem Meereis gelegene Bohrcamp vor der Küste der ausgewählten Schlüssellokalität „Mamontovy Klyk“. Die Expedition fand im April 2005 statt, die wissenschaftlichen Teilnehmer waren: Dmitry Yu. Bolshiyanov (AARI), Mikhail N. Grigoriev (PIY), Ralf Junker (UB), Viktor V. Kunitsky (PIY), Volker Rachold (AWI, Expeditionsleitung) und Waldemar Schneider (AWI).

Abb. 6: Bohrcamp auf dem Meereis vor der Küste von „Mamontovy Klyk“.

Abbildung 7 zeigt das gesamte Expeditionsteam. Inklusive der Bohrmannschaft, der Traktorfahrer und des Kochs waren 18 Personen an der Expedition beteiligt. Das genutzte Bohrgerät, ein auf ein Kettenfahrzeug montierter Bohrturm, ist in Abbildung 8 zu erkennen.

Abb. 7: Teamfoto der Expeditionsteilnehmer.

Abb. 8: Bohrgerät auf dem Meereis.

Insgesamt wurden im Rahmen der Expedition 5 Bohrungen abgeteuft (Abb. 9). Bohrung C-1, die auf dem Festland in einer Entfernung von ca. 100 m von der Küste durchgeführt wurde, erreichte eine Teufe von ca. 60 m und dient als Referenz für den unveränderten, terrestrischen Permafrost. Das Bohrloch wurde nach Abteufen der Bohrung mit einer Tem-

peraturmesskette versehen, die bis zum Sommer 2006 die Temperaturen im Permafrost aufzeichnet. Die Ergebnisse werden in internationale Messnetze zur Erfassung der Permafrosttemperaturen (GTN-P) einfließen. Erwartungsgemäß wurden in der Bohrung C-1 ausschließlich gefrorene, terrestrische Permafrostabfolgen angetroffen.

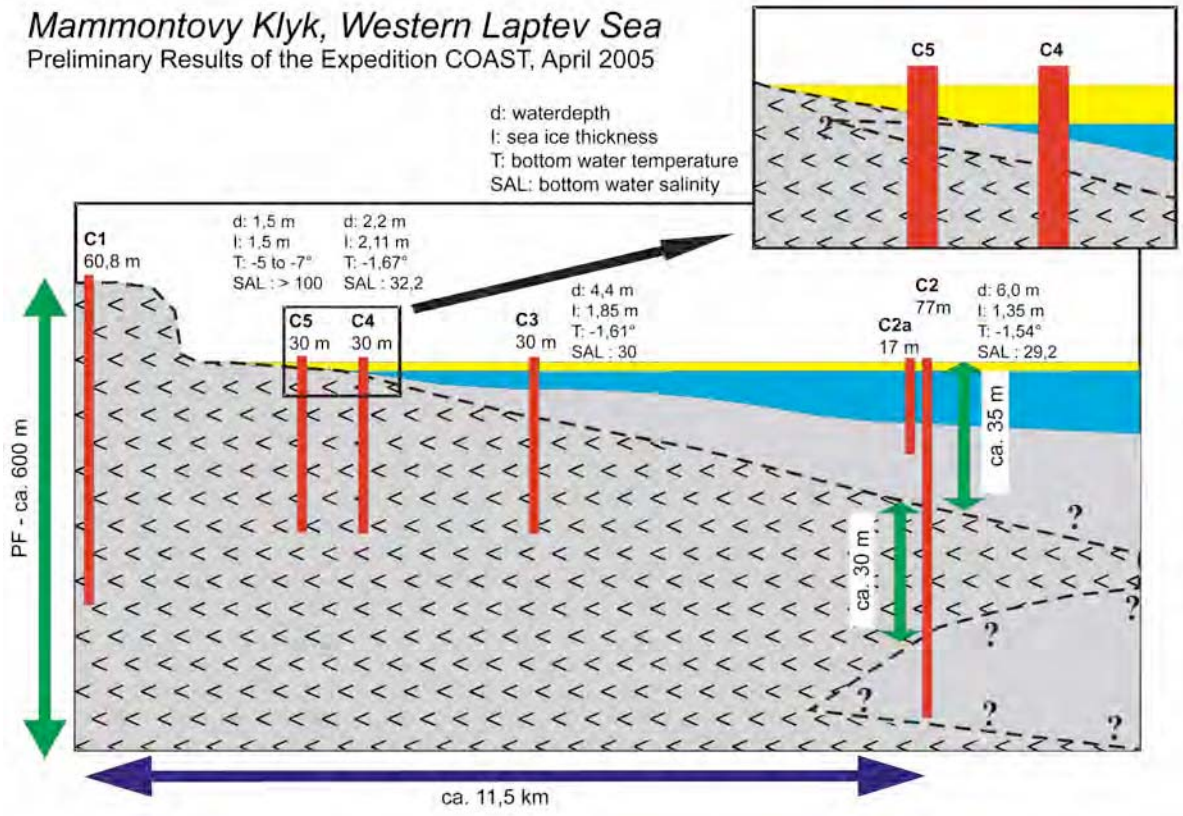

Abb. 9: Schematische Darstellung des Bohrtransektes (nicht maßstabsgetreu).

Die weiteren vier Bohrungen erfolgten vom Meereis aus und durchteuften submarine Ablagerungen. Die am weitesten von der Küste entfernte Bohrung C-2 (11,5 km Entfernung zur Küste) lag in einer Wassertiefe von ca. 6 m bei einer Meereisdicke von 1,35 m. Diese Bohrung erreichte in einer Teufe von ca. 35 m unter dem Meeresspiegel den submarinen Permafrost (Abb. 9). Dazwischen lagen 3 weitere Bohrungen, Tabelle 3 zeigt eine Übersicht aller Bohrungen.

Der Kerngewinn lag bei allen Bohrungen bei nahezu 100%. Gefrorene Sedimente wurden unmittelbar nach der lithologischen und geokryologischen Beschreibung für den Transport verpackt und konnten für die weitere Bearbeitung in gefrorenem Zustand nach Bremerhaven verfrachtet werden. Ungefrorene Kernabschnitte wurden im Gelände in Einzelproben zerlegt, die dann ebenfalls eingefroren und in gefrorenem Zustand verfrachtet wurden.

Tab. 3: Übersicht der im Rahmen der Expedition COAST I abgeteuften Bohrungen.

	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5
Entfernung zur Küste (km)	0,1	11,5	3	1	0,5
Wassertiefe (m)	-	6,0	4,4	2,2	1,5
Eisdicke (m)	-	1,35	1,85	2,1	1,5
Tiefenwassersalinität (‰)	-	29,2	30,0	32,2	> 100
Tiefenwassertemperatur	-	-1,54	-1,61	-1,67	-5 – -7
Permafrostoberfläche (m)	0	35	12	3,9	2,8

Vorher wurden von den ungefrorenen Abschnitten Teilproben entnommen, die bereits im Gelände bearbeitet wurden. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Abtrennung des Porenwassers, welches mit Hilfe einer mit Stickstoffgas betriebenen Presse aus den Sedimenten gepresst wurde. Abbildung 10 zeigt die verwendete Porenwasserpresse.

Abb. 10: Presse zur Abtrennung des Porenwassers/Poreneises im Gelände.

In Abhängigkeit vom Sedimenttyp variierte das abgepresste Porenwasservolumen zwischen 2 und 15 ml. Diese Porenwässer wurden im Labor am AWI-Potsdam mittels ICP-OES und Gaschromatographie im Hinblick auf die Hauptanionen und -kationen analysiert. Aus den Cl- und Na+-Konzentrationen konnten die Salinitäten ermittelt werden.

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen eindeutig, dass sich der terrestrische Permafrost im Bereich der Laptev-See über den Küstenbereich hinweg bis auf den Schelf fortsetzt und dort als submariner Permafrost vorliegt. In allen marinen Bohrkernen wurden gefrorene Sedimente angetroffen, deren geokryologische Eigenschaften denen des terrestrischen Permafrostes entsprechen. Abbildung 11 zeigt ein Foto eines Bohrkernes von der Bohrung C-2. Das abgebildete Kernstück stammt aus einer Tiefe von ca. 40 m unter dem Meeresspiegel und ist eindeutig als terrestrischer, heute submarin vorliegender Permafrost zu bezeichnen. Die geokryologischen Befunde werden durch die chemische und Isotopen-Zusammensetzung des Poreneises unterstützt, welche denen des terrestrischen Permafrostes entspricht.

Abb. 11: Bohrkern C-2. Deutlich erkennbar sind die eisreichen, terrestrischen Permafrostablagerungen, die nach der Transgression/Küstenerosion heute als submariner Permafrost vorliegen.

Aus den Ergebnissen der Porenwasseruntersuchungen, die in den Abbildungen 12 und 13 zusammen mit den lithologischen Profilen dargestellt sind, lassen sich weitere interessante Ergebnisse ableiten. In den Bohrungen C-2 bis C-4 finden sich im Bodenwasser normal marine Salinitäten, die sich im Porenwasser der ungefrorenen Sedimente fortsetzen. Beim Übergang vom ungefrorenen in den gefrorenen Zustand sinken die Salinitäten sprunghaft auf nahezu Frischwasserbedingungen.

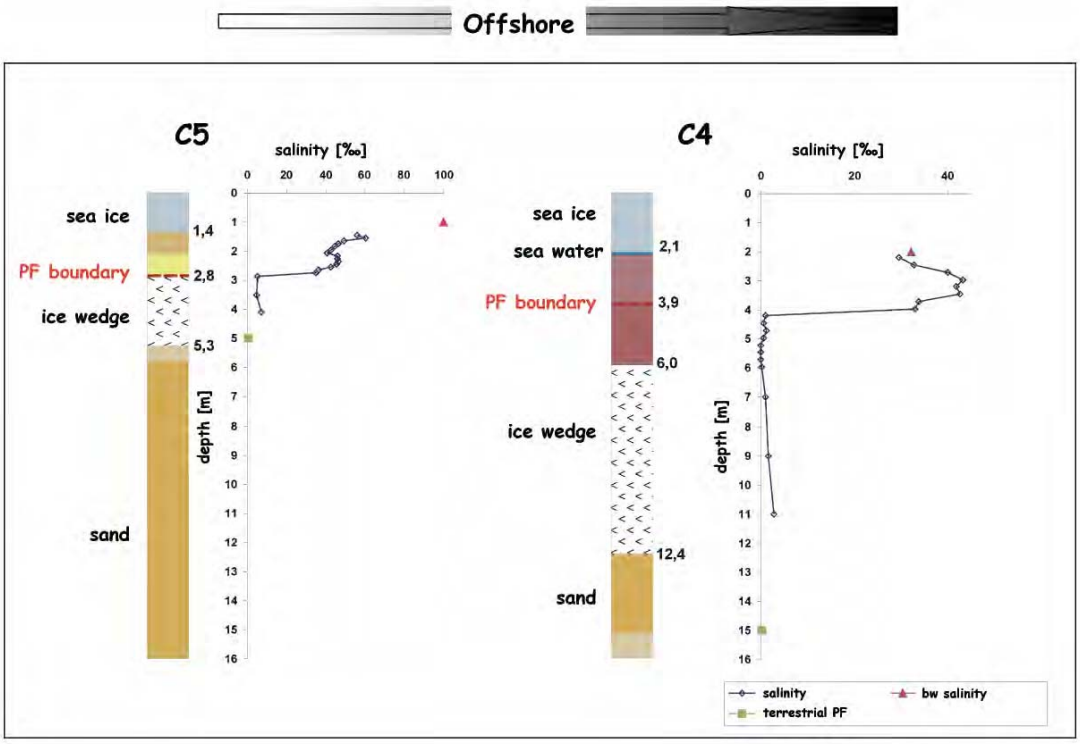

Abb. 12: Bohrprofile der küstennahen Bohrungen C-5 und C-4 (s. Abb. 9). Die Lithologie und die Salinität des Porenwassers/-eises sind angegeben; die Lage der Permafrostoberfläche ist ebenfalls dargestellt. Das Dreieck (bw salinity) bezeichnet die im Bodenwasser gemessene Salinität, das Quadrat (terrestrial PF) die Salinität des terrestrischen Permafrostes (gemessen in terrestrischen Permafrostabfolgen an „Mamontovy Klyk“).

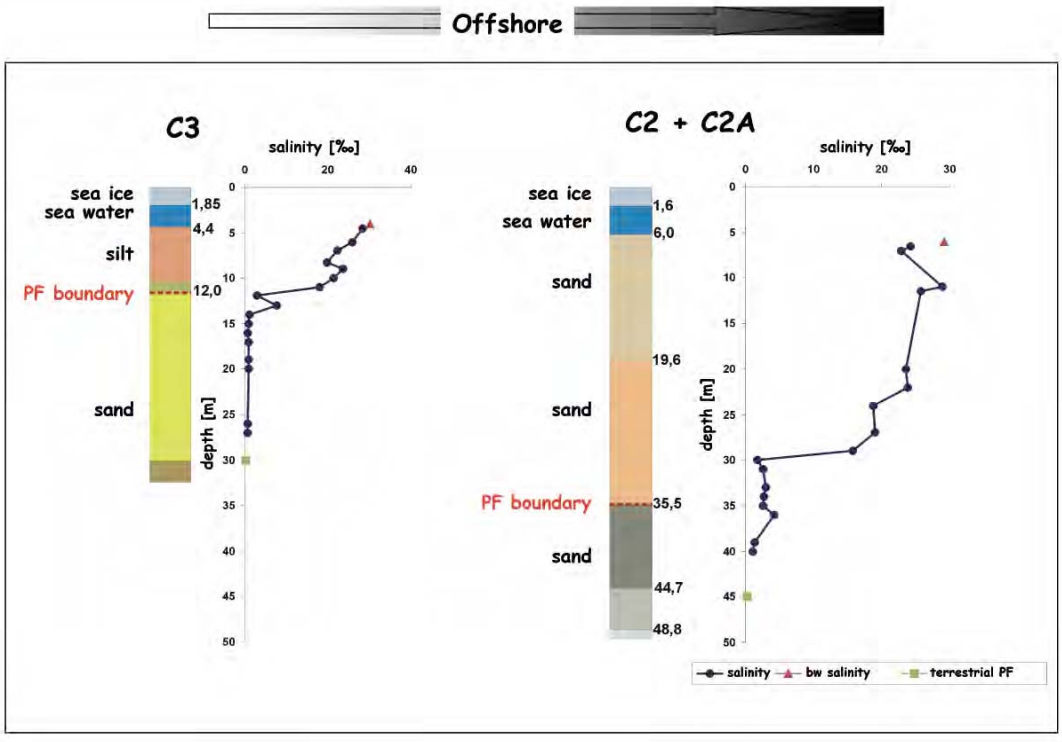

Abb. 13: Bohrprofile der küstenfernen Bohrungen C-3 und C-2 (vgl. Abb. 9). Erläuterungen s. Abbildung 12.

Eine Ausnahme bildet Bohrung C-5, in der zwischen dem Meereis und dem Sediment kein ungefrorenes Wasser vorhanden war. Bei einer Wassertiefe von 1,5 m lag das Meereis hier direkt auf dem Sediment. Allerdings wurden im Bereich von C-5 mehrere Probebohrungen durchgeführt, bei denen nach kurzer Zeit Wasser austrat, das Salinitäten von >100‰ bei Temperaturen von -5 bis -7°C aufwies. Die Erklärung hierfür ist, dass es während der Eisbildung zu einer Aufkonzentration des Restwassers kommt. Dementsprechend wurde in Bohrung C-5 nahezu direkt unter dem Meereis eine ca. 1 m mächtige ungefrorene Schicht angetroffen, die als eine Art submariner *Cryopeg* zu bezeichnen ist (s. Abb. 12).

Das interessanteste Ergebnis der Bohrkampagne wurde im unteren Abschnitt von Bohrung C-2 angetroffen. Nachdem unterhalb von 35 m Tiefe unter dem Meeresspiegel zunächst gefrorene, terrestrische Permafrostabfolgen durchbohrt wurden, stieß die Bohrung bei einer Tiefe von ca. 65 m unter dem Meeresspiegel erneut auf ungefrorene Sedimente (s. Abb. 9).

Dies ist nach den publizierten Modellen zur Permafrostverteilung, die von einer Mächtigkeit von mehreren 100 m im Küstenbereich ausgehen, ein überraschendes Ergebnis. Die sedimentologischen Befunde und die Auswertung der Porenwassersalinitäten zeigten, dass es sich bei den ungefrorenen Sedimenten um marine Abfolgen handelt. Aufgrund der marinen Salinitäten liegen diese bei einer ermittelten Temperatur von -1 bis -1,5°C in ungefrorenem Zustand vor.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- In allen Bohrungen konnten terrestrische, heute als submarine Abfolgen vorliegende Permafrostablagerungen nachgewiesen werden. Die gewonnenen Daten belegen eindeutig, dass es sich um überfluteten, terrestrischen Permafrost handelt.
- Es wurden nicht, wie bestehende Modelle prognostizieren, mehrere 100 m mächtige, submarine Permafrostabfolgen gefunden, sondern nur lagenweise gefrorene Sedimente. Diese Beobachtung hat sicher eine große Bedeutung im Hinblick auf die Stabilität von Gashydraten und die mögliche Freisetzung von Treibhausgasen aus dem submarinen Permafrost.
- Die Temperatur- und Salinitätsdaten von Bohrung C-2 deuten darauf hin, dass nicht nur die Temperatur den Zustand (gefroren oder ungefroren) der Ablagerungen bestimmt, sondern dass bei den überwiegend vorherrschenden Temperaturen zwischen 0 und -2°C die Salinität den Zustand steuert.
- Der Einfluss vom Meerwasser auf den submarinen Permafrost ist ein wichtiger, bisher kaum verstandener Prozess. Die Porenwasserdaten von Bohrung C-5 zeigen, dass sich

durch die Aufkonzentration von Salz im Porenwasser während der Eisbildung im Küstenbereich extreme Salzlaugen bilden können, die sicher eine wesentliche Rolle bei der Umwandlung vom terrestrischen zum submarinen Permafrost im Zuge von Küstenerosion spielen.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in etlichen Publikationen veröffentlicht worden (s. Liste der Veröffentlichungen im Anhang) und wurden im Rahmen von folgenden internationalen Projekten/ Programmen/Netzwerken eingebunden und nutzbar gemacht:

- „Arctic Coastal Dynamics“, ein Projekt von IASC/IPA und ein IGBP-LOICZ-Regionalprojekt (Projektleitung: V. Rachold)
- IPA (Mitglied des Vorstandes: H.-W. Hubberten) und die Arbeitsgruppe „Coastal and Offshore Permafrost“ (Leitung: V. Rachold und N.N. Romanovskii)
- ESF-Netzwerk „SEDIFLUX Sedimentary Source-to-Sink-Fluxes in Cold Environments“ (Mitglied des Leitungsgremiums: V. Rachold)
- ICARP II – Arbeitsgruppe 3 „Arctic Coastal Processes“ (Leitung: V. Rachold)
- IPY-Leitprojekt „Arctic Circumpolar Coastal Observatory Network“ (Der Projektvorschlag für ein internationales zirkumarktisches Netzwerk von Küstenobservatorien wurde vom IASC/IGBP-LOICZ-Projekt ACD, der IPA-Arbeitgruppe „Coastal and Offshore Permafrost“ sowie der ICARP-II-Arbeitsgruppe „Arctic Coastal Processes“ unter der Federführung von V. Rachold eingereicht.)

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine neuen, die Durchführungen des Vorhabens beeinflussenden Ergebnisse bekannt geworden.

AG 3: Stadien der Permafrostentwicklung

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Zu den wichtigsten Ergebnissen der AG 3 gehören eine geochronologisch untermauerte Fazies-Interpretation der Permafrostabfolgen an der Steilküste von „Mamontovy Klyk“ (Abb. 14) und eine Klima- und Umweltrekonstruktion, die sich aus den geokryologischen, isotopenchemischen und hydrochemischen Untersuchungen der dortigen Eiskeilgenerationen ergibt. Die geokryologisch-sedimentologischen Ergebnisse und Altersbestimmungen fließen auch in die Untersuchungen der mikrobiellen Prozesse im Permafrost ein, die im Rahmen der AG 1 an diesem Standort durchgeführt wurden. Zusätzlich konnte anhand von Fernerkundungsdaten und Geländemodellen die Landschaftsdynamik des Küstentieflandes der westlichen Laptev-See seit dem Spätpleistozän rekonstruiert werden. Die an der Küste aufgeschlossene Umweltgeschichte umfasst die letzten ca. 50.000 Jahre. Es lassen sich für diesen Zeitraum 4 Phasen deutlich voneinander trennen.

Vor ca. 40 bis 50 ka war das Untersuchungsgebiet im Vorland des Pronchishchev-Rückens (Abb. 15) durch eine Flusslandschaft geprägt. Das dokumentiert sich in gut sortierten, feingeschichteten und organikarmen Sanden, die zwischen 0 und 4 m ü. NN an der Küste anstehen. Sie besitzen eine massive Kryotextur, enthalten Eis-Sandkeile, aber keine syngenetischen Eiskeile. Die Sande werden vom Hangenden von Eiskeilen jüngerer Generationen durchdrungen. IR-OSL-Datierungen dieser Sande liegen zwischen 31,9±3,7 und 56,2±6,7 ka. Pflanzenreste sind selten und wurden mit ^{14}C-AMS auf >44.500 v. h. datiert.

Eine Veränderung des paläo-hydrologischen Regimes deutete sich mit der Ablagerung eines Torf-Sand-Komplexes über den liegenden Sanden an. Auf einer Aueebene kam es zwischen 44-40.000 J. v. h. wiederholt zur Torfbildung (ca. 0,5 m) und zu Überflutungen dieser Torfschichten, verbunden mit der Ablagerung von Sanden (jeweils 0,2-0,4 m). Den kryoturbierten Torfböden konnten jeweils separate Eiskeilgenerationen zugeordnet werden. Die Eiskeile sind meist <0,5 m breit und treten im Abstand von 15-20 m auf, was einen Durchmesser der Eiskeilpolygone dieser Größe vermuten lässt.

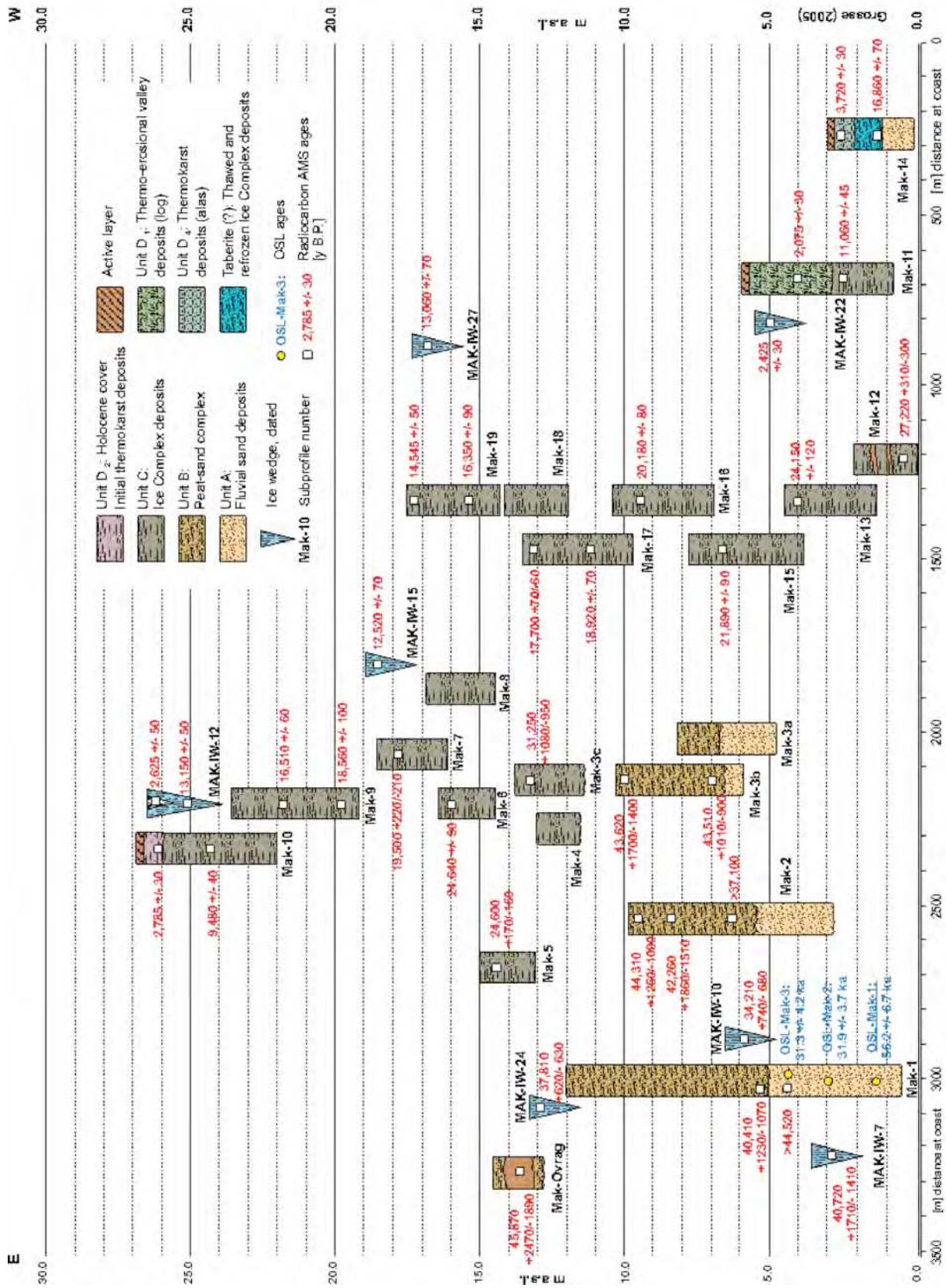

Abb. 14: Subprofile der Küstenaufschlüsse von „Mamontovy Klyk“ mit den dazugehörigen Datierungsergebnissen.

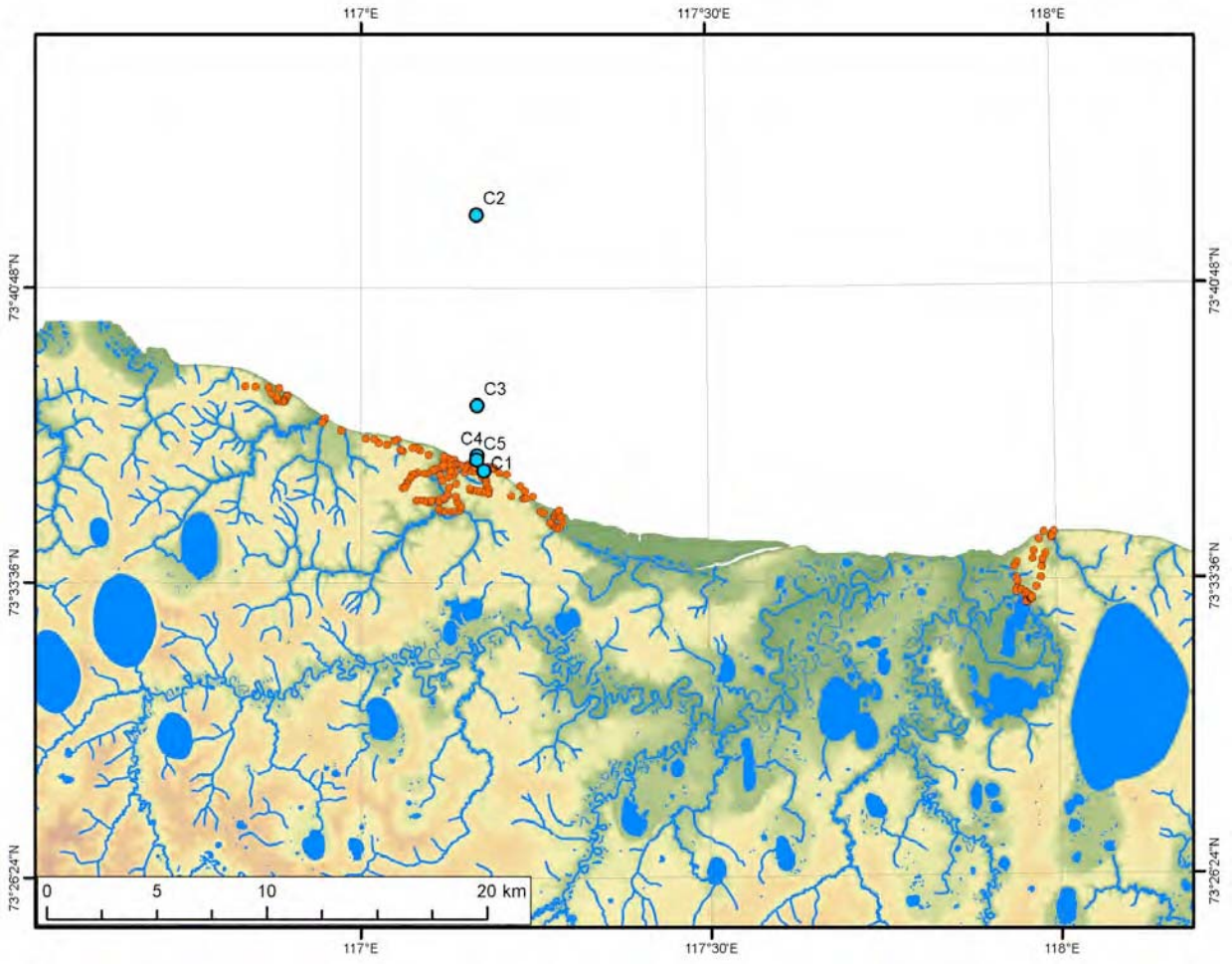

Abb. 15: Lage der Untersuchungspunkte (rot: Küstenaufschlüsse und Punkte der Oberflächenuntersuchung; blau: COAST-I-Bohrpunkte).

Die weitere Landschaftsentwicklung beinhaltete einen verstärkten Rückgang des gerichteten fluvialen Abflusses. Auf einer weiten, flachen Akkumulationsebene im Vorland des Pronshishchev-Rückens entstand eine polygonale Tundra mit relativ großen, syngenetischen Eiskeilsystemen von bis zu 10 m Durchmesser. Die darin abgelagerten Sedimente und die entsprechenden Eiskeile bilden den sogenannten Eiskomplex, eine spezielle, sehr eisreiche Permafrostsequenz mit mehreren Paläo-Bodenhorizonten (Abb. 16), der in den Küstentiefländern der sibirischen Arktis und in Zentraljakutien weit verbreitet ist. Nach ^{14}C-AMS-Datierungen bildete sich der Eiskomplex an „Mamontovy Klyk“ zwischen 31.000 und 12.000 J. v. h. Bis zum Ende des Pleistozäns war die Region durch kontinuierliche Permafrostbedingungen gekennzeichnet. Die dargestellten Veränderungen im hydrologischen Regime waren durch die spätpleistozänen Klimavariationen während des Kargin-Interstadials (entspricht MIS 3) und des Sartan-Stadials (entspricht MIS 2) bedingt.

Abb. 16: Eiskomplexsequenz von „Mamontovy Klyk“ (Profil 2); im Vordergrund ein Paläo-Boden, datiert mit 27.220+310/-300 J. v. h.

Die heutigen isolierten Hochlagen des Küstentieflandes aus Eiskomplexsedimenten (Yedoma) zwischen 30-40 m über NN werden als Reste der spätpleistozänen Akkumulationsebene angesehen, die im Holozän durch Permafrostdegradation, insbesondere Thermokarst und Thermoerosion, zerstört wurde. Die ursprüngliche Struktur dieser Akkumulationsebene lässt sich anhand eines Geländemodells annäherungsweise rekonstruieren. Ca. 78% von insgesamt 2.317 km^2 des untersuchten Küstentieflandes sind entsprechend der Oberflächenklassifikation von Grosse et al. (in press) durch Permafrostdegradation beeinflusst (Abb. 17). Während des holozänen Optimums war das hydrologische Regime von zahlreichen Thermokarstseen und dazugehörigen kleinräumigen Entwässerungssystemen (Thermoerosionstäler) bestimmt, die sich infolge des lokalen Austauens von Grundeis und der daraus resultierenden Subsidenz in Senken bildeten. Dieses Landschaftsbild ist typisch für die von eisreichem Permafrost unterlagerten Küstentiefländer Nordostsibiriens und kann auch auf die nördlich angrenzenden arktischen Gebiete des Laptev-See-Schelfes übertragen werden.

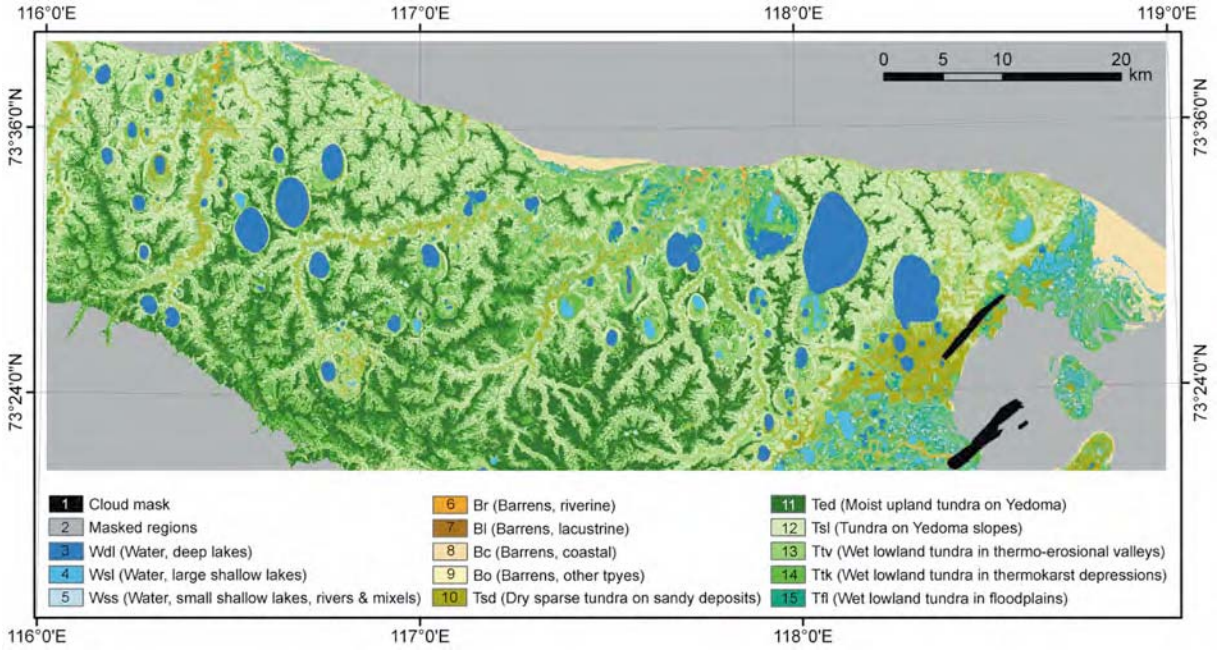

Abb. 17: Die auf Landsat-7-Daten, Geländemodellen und Felddaten basierende Landschaftsklassifikation des Untersuchungsgebietes zeigt Seen und Täler, die durch Tauen des Permafrostes im Frühholozän (10-8.000 J. v. h.) entstanden sind („Mamontovy Klyk"-Region, westliche Laptev-See). Erläuterung der Geländeklassen: 1 - Wolken, maskiert; 2 - weitere maskierte Regionen; 3 - Wasser, tiefe Seen; 4 - Wasser, große flache Seen; 5 - Wasser, kleine flache Seen, Flüsse, Grenzbereiche Wasser-Land; 6 - vegetationsfreie Flächen, Flussufer; 7 - vegetationsfreie Flächen, Seeufer; 8 - vegetationsfreie Flächen, Küsten; 9 - andere vegetationsfreie Flächen; 10 - trockene spärliche Tundra auf gut drainierten Sandablagerungen; 11 - Feuchttundra auf Hochflächen; 12 - Tundra an Hochflächenhängen; 13 - feuchte Tieflandtundra in Thermoerosionstälern; 14 - Feuchttundra in Thermokarstsenken; 15 - Feuchttundra in Überflutungsbereichen und Flussauen.

Die holozäne Permafrostdegradation wurde durch die gleichzeitig ablaufende marine Überflutung des Laptev-See-Schelfes verstärkt. Infolgedessen schließen die modernen Küsten einen Querschnitt durch die holozäne Permafrostlandschaft auf. In Permafrostablagerungen einer Thermokarstsenke wurden ^{14}C-Alter von 16.800 und 3.700 v. h. und in einem Thermoerosionstal von 11.000 und 2.100 v. h. bestimmt. In beiden Fällen wurden spätpleistozäne Ablagerungen des Eiskomplexes, der ausgetaut und später rückgefroren war, von holozänen Sedimenten bedeckt.

Weitere spätholozäne Sedimente treten oberhalb des Eiskomplexes direkt unterhalb der Kliffkante auf (Abb. 18). Sie dokumentieren gemeinsam mit einer jungen Eiskeilgeneration die Füllung kleiner, initialer Thermokarstsenken und die erneute Permafrostaggradation während der spätpleistozänen Klimaverschlechterung. Die erneute Permafrostaggradation, d. h. das Rückgefrieren, wird auch durch das Auftreten von 16 Pingos innerhalb von Thermokarstsenken im Untersuchungsgebiet belegt.

Die aktuelle Landschaftsdynamik ist durch eine neuerliche Ausbildung eines großräumigeren fluvialen Entwässerungssystems zwischen dem Pronshishchev-Rücken und der

Küste charakterisiert (s. Abb. 15), wobei die moderne Landschaft sowohl durch Permafrostneubildung auf dem Boden von großen Thermokarstsenken (Alasse) als auch durch Permafrostdegradation (Thermoabrasion an Küsten, Thermoerosion in Talsystemen) beeinflusst wird.

Abb. 18: Initiale Thermokarstsenke mit milchig weißem holozänem Eiskeil im Top des Eiskomplexes von „Mamontovy Klyk“.

Die umfangreichen isotopenchemischen und hydrochemischen Untersuchungen von Grundeis (Eiskeile, Textureis), Oberflächenwässern und Niederschlägen bieten zum einen hervorragende Vergleichsmöglichkeiten für die Charakteristik des Grundeises in den Bohrungen des COAST-I-Transsektes und erweitern den bereits bestehenden regionalen Bestand an Grundeisdaten um ein wichtiges Gebiet, das Datensätze von der Taymyr-Halbinsel mit denen des Lena-Deltas verbindet. Zum anderen konnte vor allem anhand der stabilen Sauerstoff- und Wasserstoffisotope ($\delta^{18}O$, δD) die spätpleistozäne bis holozäne Klimadynamik, insbesondere die Winter-Temperaturen, rekonstruiert werden (Abb. 19). Extreme kalte Winter waren für die Zeit vor 50-60.000 J. v. h. charakteristisch. Stärkere Variationen in der Zeit des Kargin-Interstadials sind vermutlich nicht immer klimarelevant und könnten auf Überflutungsereignisse zur Zeit der Bildung des Torf-Sand-Komplexes hinweisen. Stabile, sehr kalte Winter-Temperaturen charakterisieren die Zeit der Bildung des Eiskomplexes, an dessen

Top ein deutlicher Erwärmungstrend vom Spätpleistozän zum Holozän aus den $\delta^{18}O$- und δD-Werten der Eiskeile erkennbar ist. Die Isotopen-zusammensetzung in rezenten Eiskeilen zeigt an, dass das heutige Winterklima das wärmste im untersuchten spätquartären Zeitabschnitt ist.

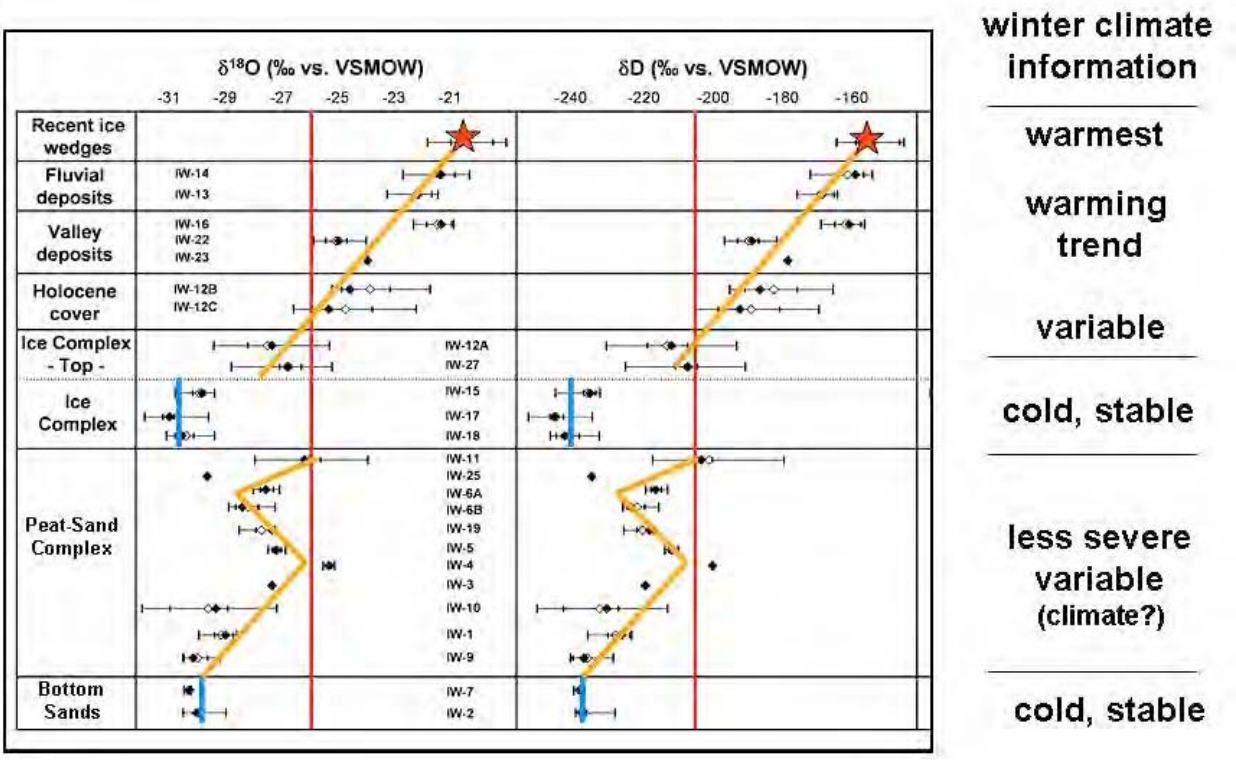

Abb. 19: Variationen und Trends der $\delta^{18}O$- und δD-Werte der Eiskeile mit ersten Klimainterpretationen.

Unterschiede in der Ionenzusammensetzung der Eiskeile (Abb. 20) belegen aufgrund erhöhter Chlorid- und Natriumgehalte einen größeren maritimen Einfluss während des Holozäns und stärker kontinental geprägte Bedingungen im Spätpleistozän. Diese Interpretation stimmt mit den generellen Umwelttrends der Laptev-See-Region während des spätpleistozän-holozänen Umbruchs überein. Diese Werte stellen einen wichtigen Vergleichsdatensatz für die hydrochemischen Untersuchungen an submarinem Permafrost dar.

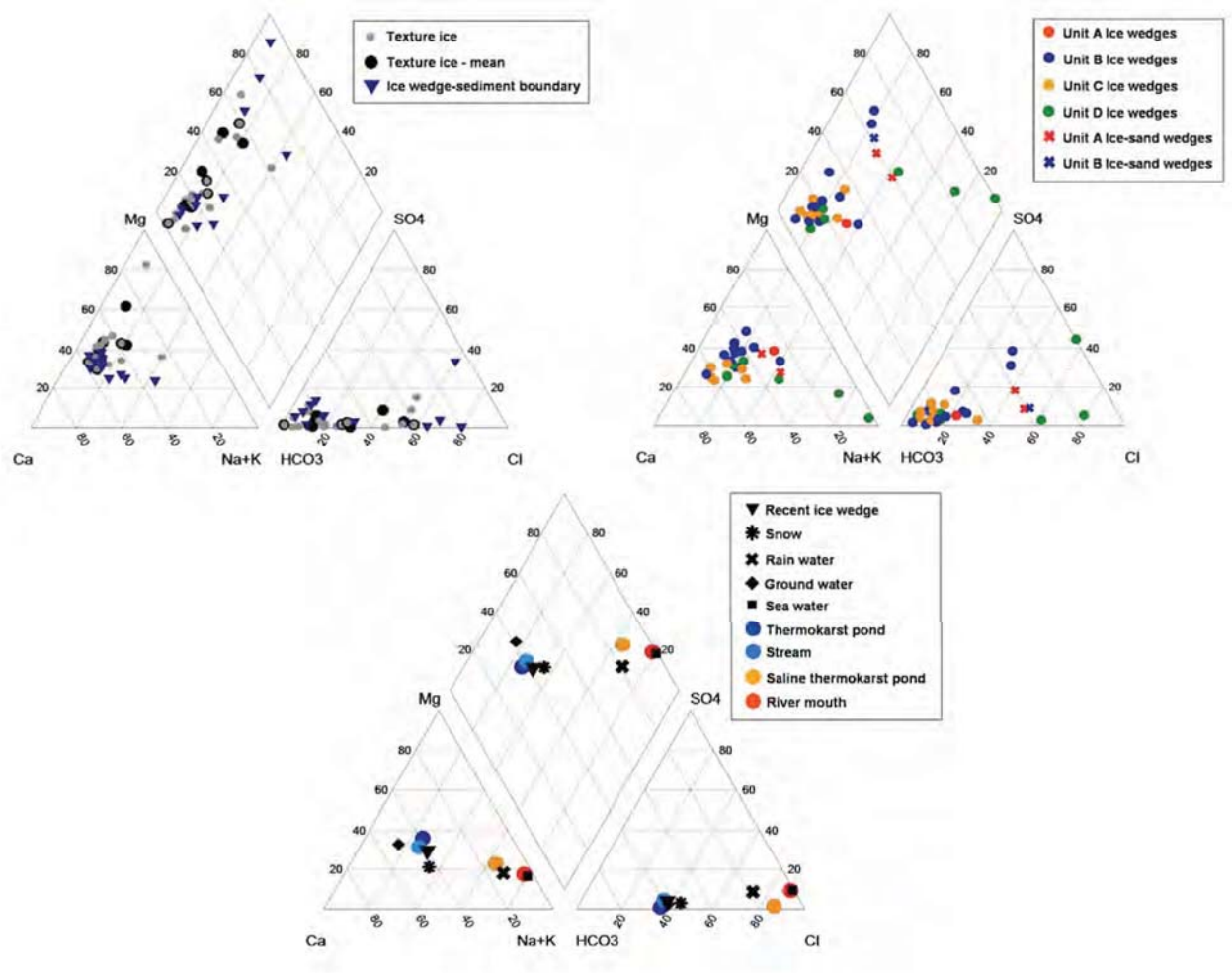

Abb. 20: Hydrochemische Zusammensetzung von Textureis (oben links) und Eiskeilen (oben rechts) der untersuchten Permafrostsequenzen von „Mamontovy Klyk“ sowie von verschiedenen rezenten Wässern (unten Mitte) aus dem Untersuchungsgebiet.

In den bis 80 m unter den Meeresspiegel reichenden Bohrungen des COAST-I-Transektes (C-1 bis C-5) ist die frühere quartäre Umwelt- und Permafrostdynamik weit über den am Küstenkliff datierten Zeitraum hinaus dokumentiert (Abb. 21). Die oberen Abschnitte der Landbohrung C-1 durchteuften den Eiskomplex und die darunter liegenden sandigen Einheiten. In den tieferen Abschnitten deuten Schalenreste und kohliger Detritus auf weitere Fazieswechsel hin, die z. Z. genauer untersucht werden.

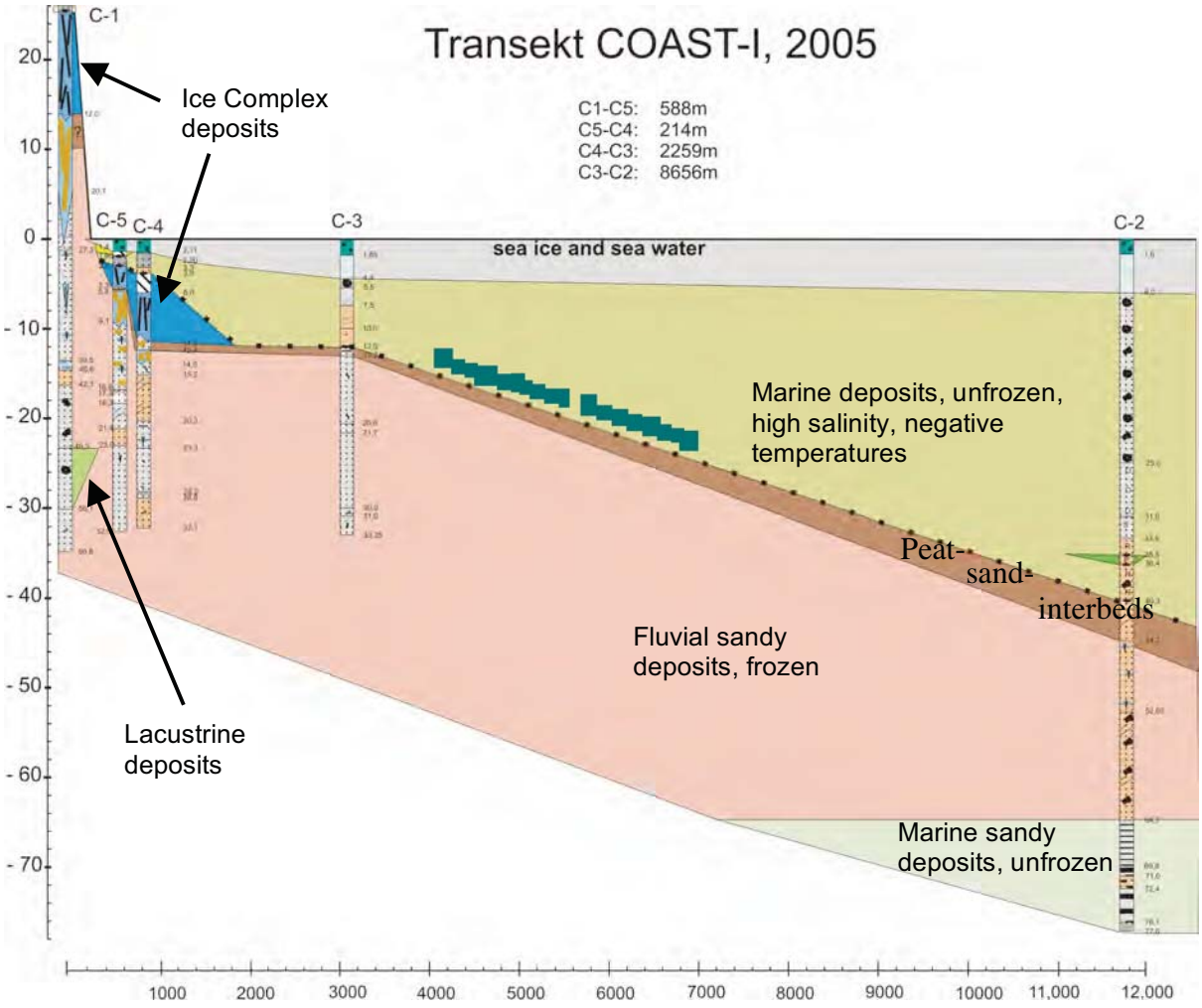

Abb. 21: Schematisches Querprofil des COAST-I-Profils mit ersten lithologischen Interpretationen.

Die kryolithologischen und sedimentologischen Feldansprachen der Bohrkerne C-2 bis C-5, erste Analyseergebnisse zu Eisgehalten und die im Zuge der AG 2 bereits realisierten geochemischen Untersuchungen belegen die umfangreiche Erhaltung von terrestrischem Permafrost unterhalb des Meeresbodens. Dafür sprechen auch die in der landfernsten Bohrung C-2 in 55 m Tiefe erbohrten Torf-Sand-Wechsellagerungen (Abb. 22). Erste Untersuchungen der stabilen Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenzusammensetzung von Eiskeilen und Textureis aus den COAST-I-Bohrungen zeigen, dass es sich hierbei tatsächlich um alten Permafrost handelt, da sie ihren Analogen aus dem Küstenaufschluss „Mamontovy Klyk“ entsprechen. Dies ist der analytische Beweis des Erhalts von altem, pleistozänem Permafrost unter der Laptev-See.

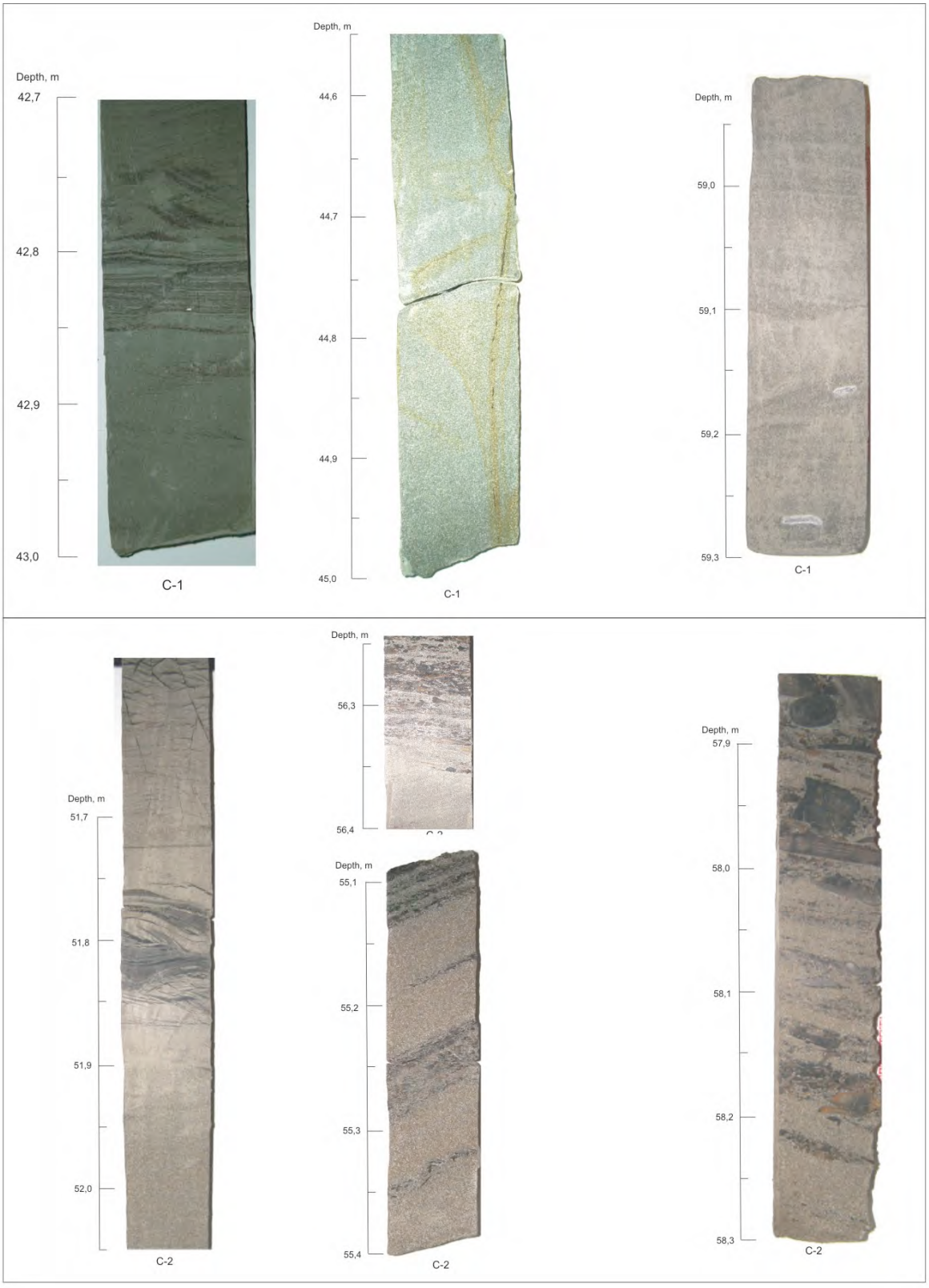

Abb. 22: Beispiele für Sediment- und Kryostrukturen aus der Landbohrung C-1 (obere Reihe) und der landfernsten Bohrung C-2 (untere Reihe).

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des TSP-Netzwerkes ist ein langfristiges Permafrostobservatorium in der Festlandsbohrung C-1 vorgesehen. Darüber hinaus werden weitere paläoökologische Untersuchungen am vorhandenen Probenmaterial im Zuge neuer Forschungsprojekte (z. B. DFG-Schwerpunktprogramm Interdynamik) durchgeführt.

Die Messdaten werden in der PANGAEA-Datenbank gespeichert.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine neuen, die Durchführungen des Vorhabens beeinflussenden FE-Ergebnisse bekannt geworden.

Literatur

Grosse, G., Schirrmeister, L., Malthus, L. and Timothy, J. (in press) Application of Landsat-7 satellite data and a DEM for the quantification of thermokarst-affected terrain types in the periglacial Lena-Anabar coastal lowland. Polar Research.

AG 4: Temperaturfelder im Permafrost

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Aufgrund der Verzögerungen bzw. des Ausfalls der Forschungsaufenthalte in der Laptev-See konnten nicht alle Projektziele wie geplant realisiert werden. Zusätzlich konnten jedoch Fragestellungen zur Stabilität des submarinen Permafrostes bearbeitet werden, die sich im Laufe der Forschung ergaben. Im Besonderen sind hier Vorabuntersuchungen zu Laborexperimenten und numerische Modellierungen zu nennen. Die ausgewerteten Daten der Expedition werden in einem gemeinsamen Kontext mit den übrigen Resultaten veröffentlicht. Die technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse, die in der AG 4 erzielt wurden, sind im Folgenden aufgeführt.

Technische Entwicklungen

Für den Einsatz während der COAST-I-Expedition war die Entwicklung einer neuartigen Bohrlochsonde zur Messung von Temperaturen notwendig. Die Trockenbohrtechnik der russischen Bohrmannschaft in den flachen Küstenbohrungen vom Festeis der Laptev-See aus warf die Frage auf, mit welcher schnellen Messmethode, die nicht auf eine gute thermische Ankopplung von Bohrflüssigkeit in der Bohrung angewiesen ist, verlässliche Daten erzeugt werden können. Die technische Lösung, die eigens hierfür an der Universität Bremen entwickelt wurde, sieht die kontinuierliche Messung der Bohrlochtemperatur mittels Infrarot-Sensor (Pyrometer) vor, der in eine Bohrlochsonde implementiert wurde (Abb. 23). So konnten die Daten im Gelände unter arktischen Temperaturen und den vorgegebenen technischen Rahmenbedingungen optimal gewonnen und gesichert werden.

Abb. 23: Die Infrarot-Temperatur-Bohrlochsonde, die an der Universität Bremen entwickelt wurde, um kontaktfrei Temperaturen in trockenen Bohrlöchern messen zu können.

Für den Einsatz während der Expeditionen TRANSDRIFT X bzw. TRANSDRIFT XI wurde ebenfalls eine Temperaturbohrlochsonde entwickelt, die den speziellen Anforderungen eines Schiffseinsatzes unter arktischen Bedingungen entspricht.

Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Durch den Aufschub der Expeditionen war ausreichend Zeit, um numerische Modellierungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode durchzuführen. Diese sollten zeigen, inwiefern die bisher existierenden Berechnungen zur Mächtigkeit und Verbreitung des submarinen Permafrostes nachvollziehbar sind und welche Bereiche untersucht werden müssen, um ein möglichst vollständiges Bild von der Dynamik des Permafrostes in der Laptev-See zu erhalten.

Abbildung 24 zeigt einen Schnitt durch den Schelf der Laptev-See nach einer FEM-Modellierung. Der Zeitraum der Modellrechung beläuft sich auf 50.000 J. v. h. bis zur Gegenwart. Rahmenparameter wie Klimakurven, Meerwassertemperatur und Gesteinsparameter wurden in Zusammenarbeit mit AG 3, 5 und 7 erarbeitet und der einschlägigen Literatur entnommen (Romanovskii et al., 2000; Bauch et al., 2001).

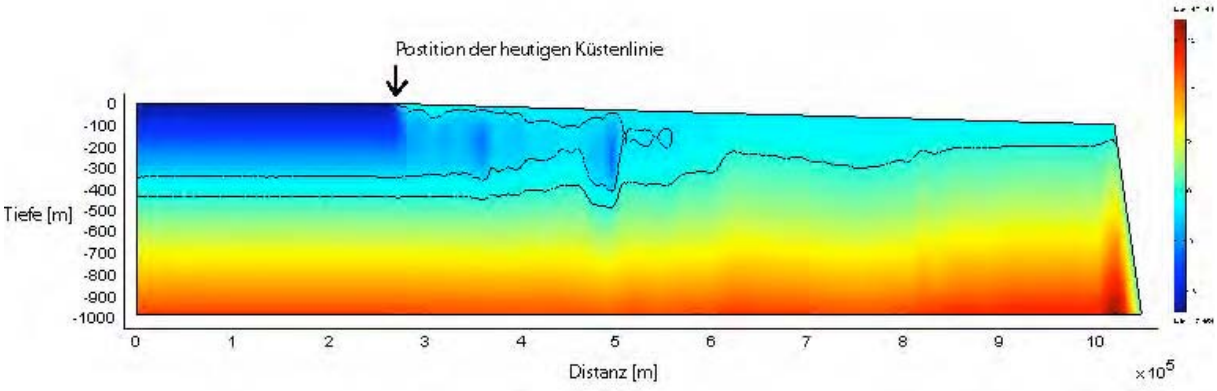

Abb. 24: Finite-Elemente-Modell des Laptev-See-Schelfes. Aufgrund der Modellrechnungen wird eine Verbreitung des submarinen Permafrostes bis in eine Tiefe von ca. 500 Metern erwartet. Jedoch sind die Temperaturen nur geringfügig (bis -4°C) unter dem Taupunkt, der im Sediment zwischen -1,2 und 0°C liegt.

Das Ergebnis zeigt, dass theoretisch Permafrostbedingungen unter dem Meeresboden bis in eine Tiefe von max. 500 Metern bestehen. Allerdings zeigt die Temperaturverteilung ebenfalls, dass die Temperaturen nur geringfügig unter dem Taupunkt des Permafrostes liegen und somit eine Destabilisierung bei veränderten Randbedingungen möglich ist. Dies kann z. B. durch einen Anstieg der Meerwassertemperaturen im Zuge regionaler oder globaler Klimaerwärmung geschehen (vgl. AG 7).

Eines der Ergebnisse ist, dass die Entwicklung des submarinen Permafrostes – also der Übergang von terrestrischem zu submarinem Permafrost – sich in einem schmalen Bereich von wenigen Kilometern Entfernung zur Küste vollzieht, da hier die Temperaturgradienten besonders groß sind. Bereits nach ca. 2.500 m Entfernung stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein, das selbst in 100 m Bohrtiefe keine signifikanten Gradienten mehr erwarten lässt.

Die Wirkung des Permafrostes als sogenannter „cap rock“ – als großflächiger Lagerungsdeckel für Gashydrate – ist bei den Temperaturen (Abb. 25) nahe dem Taupunkt trotz niedriger thermischer Gradienten fraglich, da bereits Flussläufe und deren Taliks zu „Löchern“ im Permafrost führen können (Delisle, 1998). Das Auftauen von der Basis des Permafrostes her ist ebenfalls sehr entscheidend für dessen Stabilität, da die Laptev-See von mehreren Riftzonen durchzogen ist (Ust-Lena-Rift und Gakkelrücken), die auf den passiven Kontinentalrand auslaufen und mit einem deutlich erhöhten Wärmefluss einhergehen (Drachev et al., 2003).

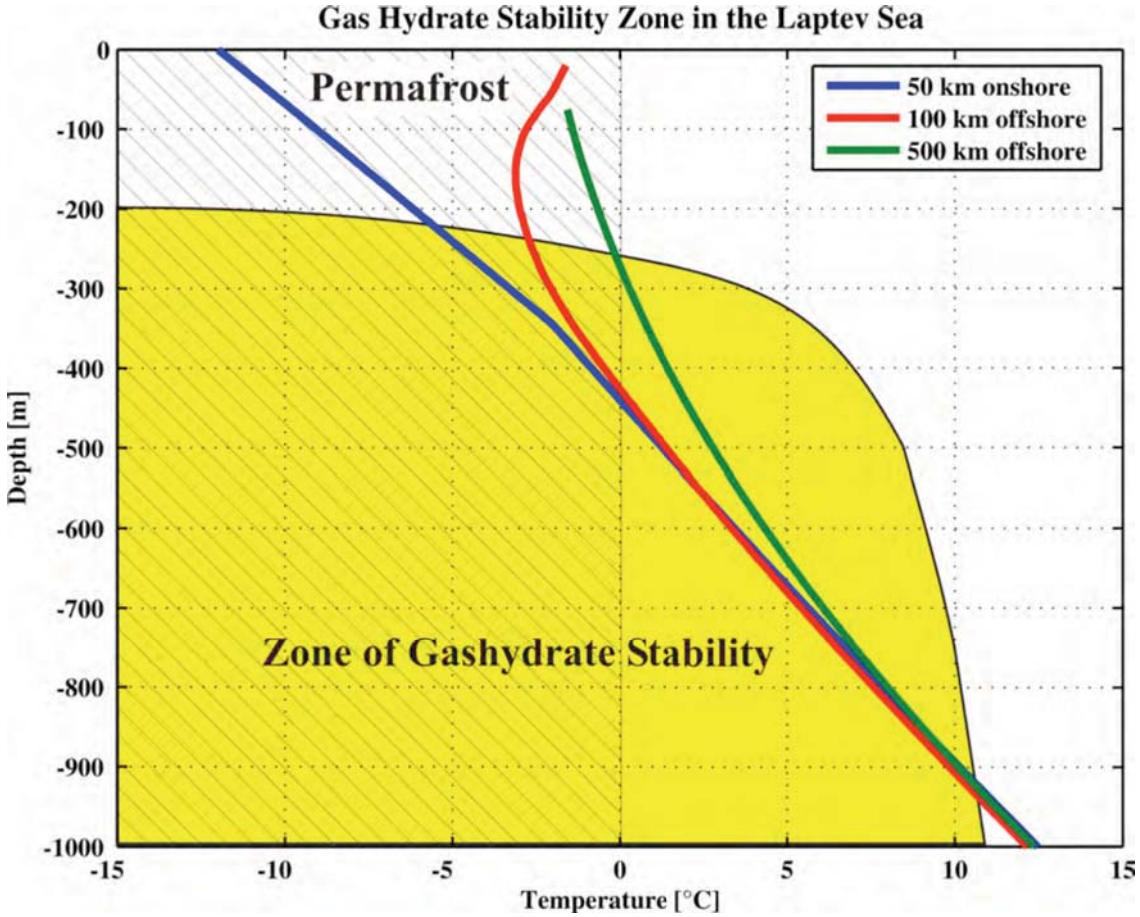

Abb. 25: Das gelbe Feld zeigt den Bereich der Stabilitätsbedingungen für Methangashydrate in Permafrostböden. Die drei Temperatur-Profile wurden aus der numerischen Modellierung in verschiedenen Entfernungen zur Küste erzeugt. Die Existenz von Gashydrat ist demnach sowohl unter kaltem als auch temperiertem Permafrost zwischen 250 und über 900 m Teufe möglich. Der lokale Einfluss durch den erhöhten Wärmestrom über einer Riftzone verschiebt die untere Grenze deutlich nach oben.

Vorabuntersuchungen zu Laborexperimenten

Während der Arbeiten an der Modellierung und der Durchsicht der Literatur wurde klar, dass der Einfluss des im Meerwasser gelösten Salzes an der Grenzschicht zwischen Wasser und Permafrost einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität des Eises im Permafrost hat. Diese

Tatsache wurde zwar schon des öfteren postuliert, aber nur unzureichend untersucht. Physikalische Grundlage dieses Phänomens ist die Gefrierpunkterniedrigung des Wassers durch gelöste Salze. Abbildung 26 verdeutlicht den Mechanismus, bei dem das salinare Meerwasser das Eis des submarinen Permafrostes in den Porenräumen des Sediments anlöst und somit unabhängig von Temperaturänderungen zur Destabilisierung des Permafrostes beitragen kann.

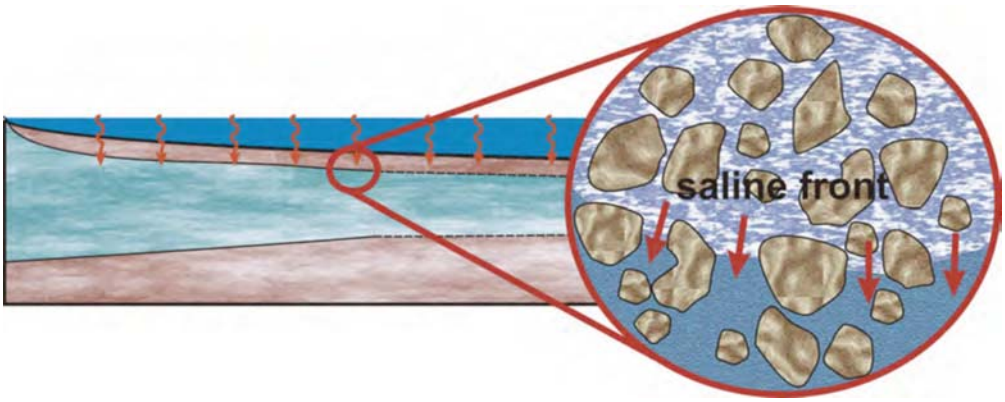

Abb. 26: Degradation des submarinen Permafrostes durch das Antauen des Eises durch das im Meerwasser gelöste Salz.

An der Universität Bremen wurden in einer Klimakammer erste Machbarkeitsstudien angestellt, um im Hinblick auf eine eventuelle Weiterführung des Verbundvorhabens „System Laptev-See“ eingehendere Untersuchungen anstellen zu können.

Ergebnisse der COAST-I-Expedition

Mit einem Jahr Verzögerung konnte die Expedition Coast I in die Laptev-See im April 2005 stattfinden. Das Zeitfenster für die Expedition lag in dem engen Zeitraum zwischen April und Mai, da nur zu dieser Jahreszeit die klimatischen Bedingungen in der Laptev-See passend sind, um eine Bohrkampagne vom Meereis aus durchzuführen.

In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern des AWI Potsdam, des PIY in Jakutsk und des AARI in St. Petersburg konnten umfangreiche Daten aus dem Übergangsbereich des terrestrischen zum submarinen Permafrost erhoben werden. Als Arbeitsgebiet wurde die Lokalität „Mamontovy Klyk“ westlich des Lena-Deltas ausgewählt, da hier die Prozesse beim Übergang des Permafrostes ohne den störenden Einfluss von Flusszuläufen untersucht werden können (vgl. AG 2 und 3).

Insgesamt wurden fünf Bohrungen niedergebracht. Eine Bohrung erfolgte auf dem Festland ca. 150 m von der Küste entfernt. Sie dient als Referenz für die Situation im

terrestrischen Bereich. Diese Bohrung ist mit einer Messkette und einer Langzeitregistrierung bestückt worden, deren Daten im Rahmen des „Global Terrestrial Network for Permafrost“ der „International Permafrost Association“ genutzt werden. Die vier weiteren Bohrungen wurden auf einem Transekt bis zu einer Distanz von 11 km von der Küste vom Festeis der Laptev-See aus abgeteuft. Insgesamt wurden über 200 Meter erbohrt und eben so viele Kernmeter entnommen (Abb. 27).

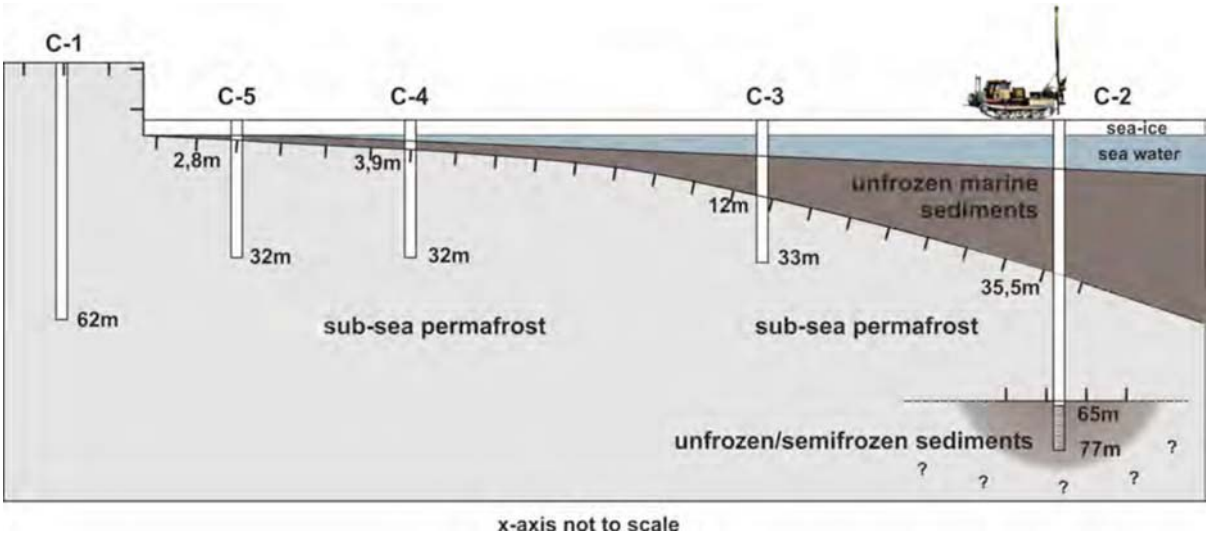

Abb. 27: Schematische Übersicht der während Coast I durchgeführten Bohrungen.

Abb. 28: R. Junker bei der Durchführung der Temperaturmessungen am Bohrloch.

In allen Bohrungen wurde die Temperatur gemessen (Abb. 28). Die Auswertung der Temperaturdaten hat gezeigt, dass der Übergang vom terrestrischen Permafrostboden zum heutigen Zustand des submarinen Permafrostes in einem sehr schmalen Bereich von ca. 2 km

stattfindet (Abb. 29). Danach hat sich der Permafrost in seiner Temperatur den Meerwassertemperaturen angeglichen und ist soweit in einem stabilen Zustand, allerdings nahe seiner Stabilitätsbedingungen. Die Breite dieser Übergangszone ist hierbei von der Küstenrückschrittsrate abhängig. Bei „Mamontovy Klyk“ beträgt diese ca. 4 m pro Jahr.

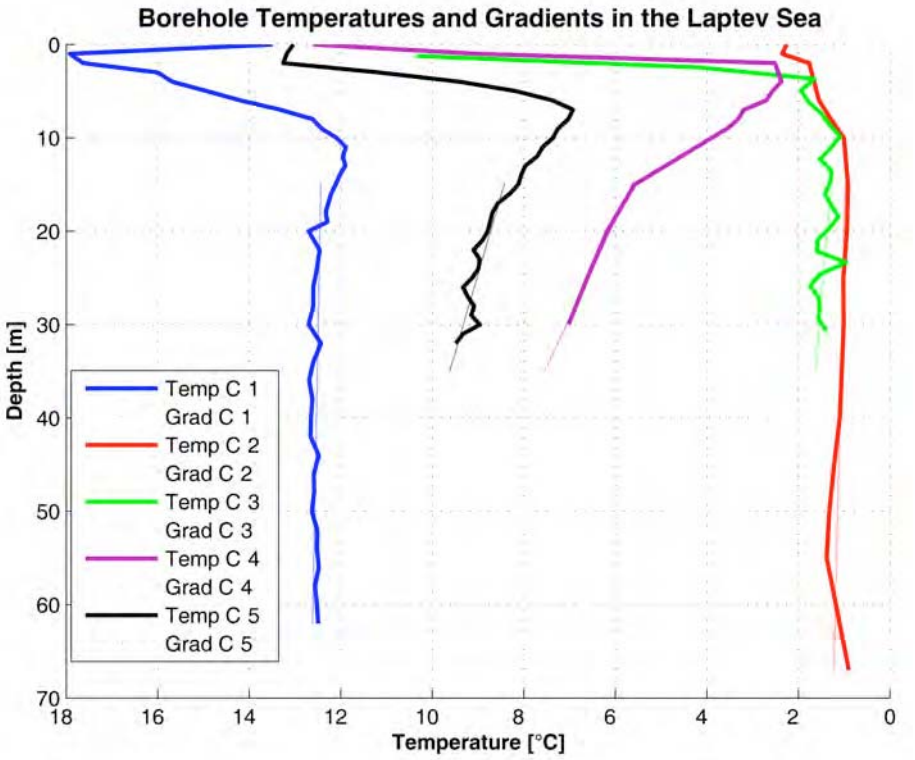

Abb. 29: Die Temperaturen in den Bohrungen zeigen ein rasches Angleichen an die Meerwassertemperaturen mit zunehmender Entfernung zur Küste. Bereits in einem Abstand von ca. 2 km von der Küste, was einem Zeitraum für die Überflutung von ca. 600 Jahren entspricht, ist der submarine Permafrost nahezu isotherm mit dem auflagernden Meerwasser.

Wärmeleitfähigkeitsmessungen konnten an den Bohrkernen aus technischen Gründen unter den klimatischen Bedingungen vor Ort nicht durchgeführt werden. Eine Laborumgebung mit ausreichend stabilisierten thermischen Randbedingungen ließ sich unter den arktischen Feldbedingungen nicht realisieren. Diese Messungen sollten zu einem späteren Zeitpunkt im Kernlager des AWI vorgenommen werden.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die neuartige Entwicklung der Infrarot-Messungen in Bohrlöchern wurde über die InnoWi (Transferstelle der Universität Bremen) auf Tauglichkeit zur Patentanmeldung geprüft (Nr. 121E2004-9/UN107-1), aber wegen der eingeschränkten kommerziellen Anwendbarkeit freigegeben.

Die Ergebnisse der COAST-I-Expedition lieferten erstmals Daten, die den Zustand des submarinen Permafrostes in der Überganszone vom terrestrischen zum submarinen Permafrost und die an seiner Degradation beteiligten Prozesse zeigen.

Die Temperaturdaten aus den Bohrungen und die Wärmeleitfähigkeitsmessungen können ferner als Eingabeparameter für weitere Modellrechungen dienen.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine neuen, die Durchführungen des Vorhabens beeinflussenden FE-Ergebnisse bekannt geworden.

Literatur

Bauch, H.A., Müller-Lupp, T., Spielhagen, R.F., Taldenkova, E., Kassens, H., Grootes, P.M., Thiede, J., Heinemeier, J. and Petryashov, V.V. (2001) Chronology of the Holocene transgression at the northern Siberian margin. Global and Planetary Change, 31 (1-4): pp. 125-139.

Delisle, G. (1998) Numerical simulation of permafrost development in the Laptev Sea, Siberia. In: Proc. 7th International Conference on Permafrost in Yellowknife, Canada, pp. 213-219.

Drachev, S.S., Kaul, N. and Beliaev, V.N. (2003) Eurasia spreading basin to Laptev shelf transition: structural pattern and heat flow. Geophysical Journal International, 152: pp. 688-698.

Romanovskii, N.N., Gavrilov, A.V., Tumskoy V.E., Kholodov, A.L., Siegert, C., Hubberten, H.-W. and Sher, A.V. (2000) Environmental evolution in the Laptev Sea during Late Pleistocene and Holocene. Polarforschung, 68: pp. 237-245.

AG 5: Charakterisierung des Ablagerungsmilieus von submarinem Permafrost

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Ein wesentliches Ziel der Arbeiten in AG 5 war die Charakterisierung von submarinem Permafrost. D. h., um die zeitliche Dynamik des submarinen Permafrosts und die steuernden Faktoren verstehen zu können, waren eine genaue Kenntnis der Chronologie und ein gutes Verständnis des jeweiligen Umweltsmilieus, insbesondere der paläoklimatologischen und -ökologischen Verhältnisse, unabdingbar. Die wissenschaftlichen Zielsetzungen dieser Arbeitsgruppe konzentrierten sich daher auf folgende Schwerpunkte:

- Erstellung eines stratigraphischen Gerüsts der Bohrungen auf der Basis von Datierungen
- paläontologische Charakterisierung von terrestrischen und marinen Ablagerungsmilieus
- Dokumentation der Grenzschichten von submarinem Permafrost und marinen Sedimenten

Aufgrund der Tatsache, dass die geplanten Expeditionen mit dem Bohrschiff „Kimberlit“ während des Sommers 2004 bzw. 2005 wegen äußerst widriger Wetterbedingungen nicht durchgeführt werden konnte, war es nicht möglich, wissenschaftliche Studien an neuem Sedimentmaterial vorzunehmen. Aus diesem Grund wurden weitere Arbeiten an schon vorhandenem Material, vornehmlich Sedimentkern PS51/135 und der Bohrung KI005 (nördliche Jana-Rinne) sowie aus der südlichen Lena-Rinne und dem nördlichen Schelfhang, durchgeführt. Diese Arbeiten umfassten somit weitergehende Studien zur früh-holozänen Entwicklung des Laptev-See-Schelfs mittels paläontologischer und geochemischer Ansätze und schlossen sich zeitlich direkt an die Arbeiten zum Thema submariner Permafrost.

Auf der Basis von PARASOUND-Daten und hochauflösenden 5-KHz-Echolotdaten, die während der Expedition TRANSDRIFT X aufgezeichnet wurden, lässt sich in der östlichen Laptev-See eine ca. 10-20 m mächtige Sedimentbedeckung erkennen. In der nördlichen Jana-Rinne beträgt die holozäne Sedimentmächtigkeit jedoch nur ca. 10-12 m (Abb. 30).

Die Untersuchungen zu den spezifischen Ablagerungsbedingungen konzentrierten sich zum einen auf die geochemischen Analysen von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) im Gesamtsediment und zum anderen auf die paläo-ökologischen Erkenntnisse auf der Basis von Fossilgemeinschaften. Beide Methoden erlaubten Aussagen über die Charakterisierung von terrestrischem Sedimenteintrag bzw. des Ablagerungsmilieus während der Frühphase der holozänen Transgression.

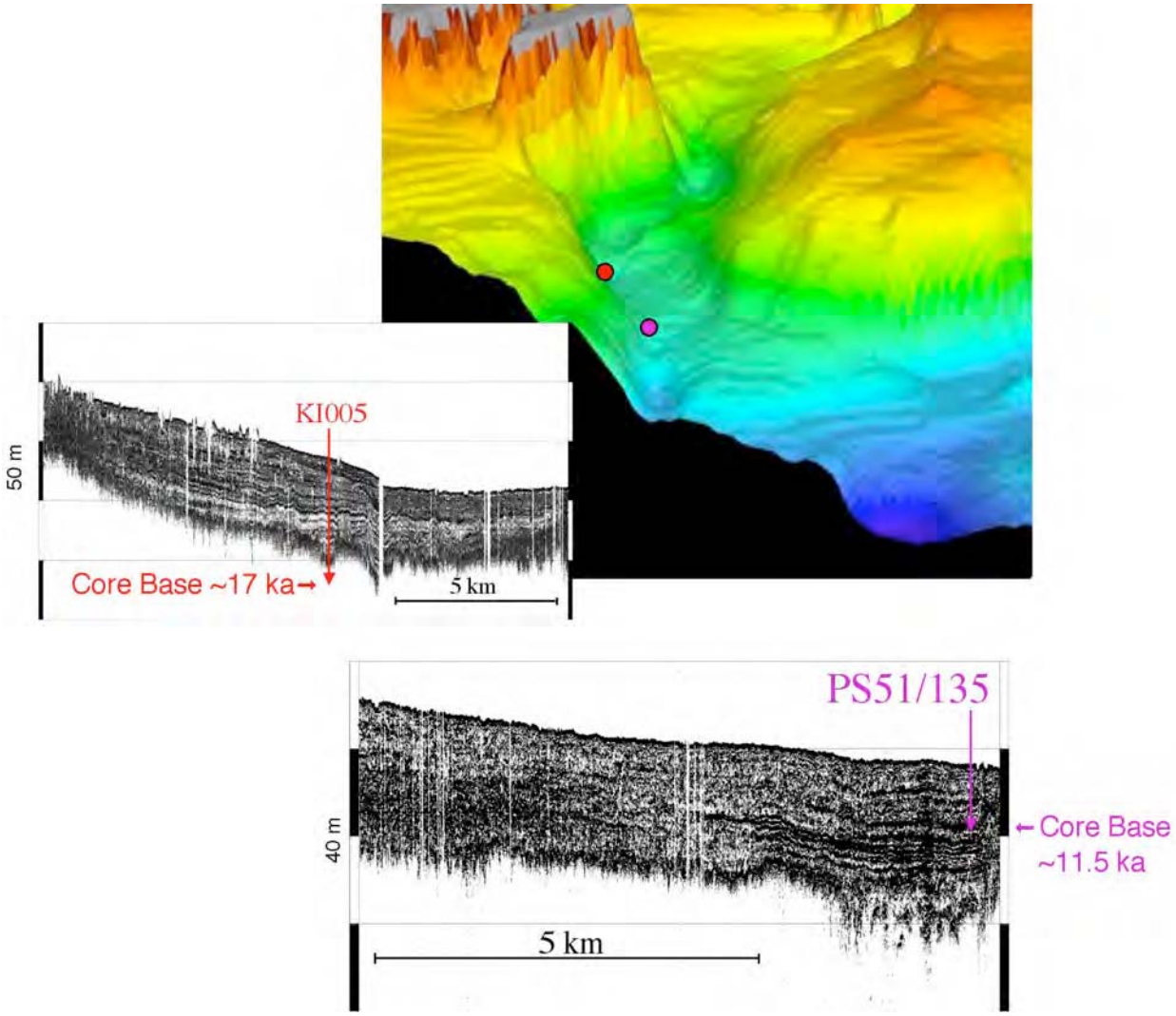

Abb. 30: Vergleiche von Sedimentecholotprofilen aus der nördlichen Jana-Rinne (nordöstliche Laptev-See) zeigen die jeweilige Lokation von Sedimentkern PS51/135 (Expedition TRANSDRIFT V mit „Polarstern“, 1998) und der Bohrung aus dem Jahr 2000 (Expedition TRANSDRIFT VIII mit „Kimberlit“, 2000). Die holozäne Sedimentschicht ist hier ca. 10-12 m mächtig und überlagert einen transparenten Bereich mit keiner Echoeindringung (submariner Permafrost).

Alle benthischen Fossilgemeinschaften (Bivalven, Ostrakoden, Foraminiferen) zeigen einen offensichtlichen Trend von einem küstennahen Brackwassermilieu hin zu einem typischen Schelfmilieu mit fast normalen marinen Salinitäten im Bodenwasser nach ca. 10 ka (Abb. 31).

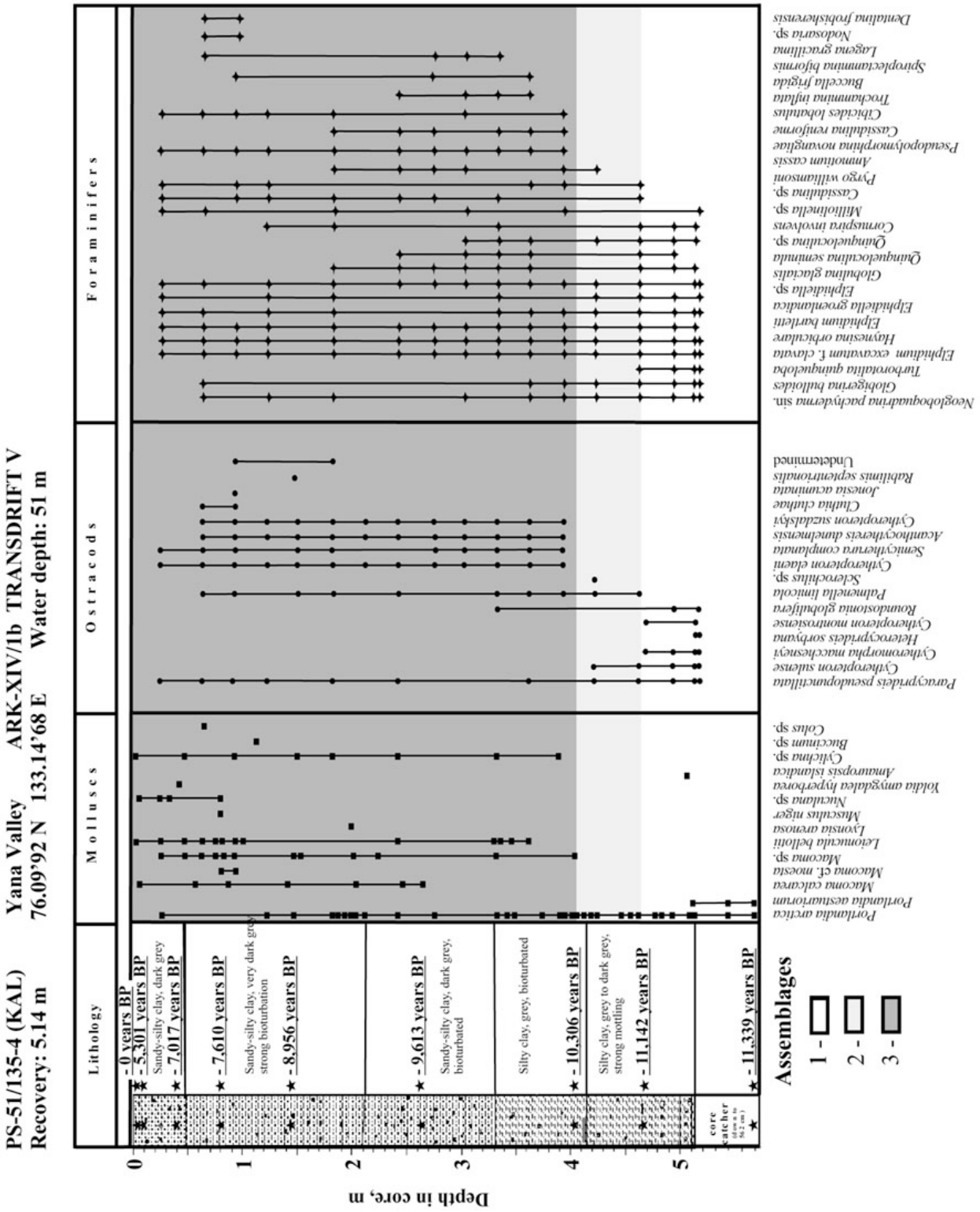

Abb. 31: Paläo-ökologische Interpretation der untersuchten benthischen Fossilgemeinschaften aus dem Sedimentkern PS51/135 (Taldenkova et al., 2005). 1 – küstennah, brackisch; 2 – innerer Schelf; 3 – mittlerer Schelf, normal marine Salinitäten.

Vergleicht man diesen Trend jedoch mit den rekonstruierten Salinitäten im Oberflächenwasser, so lässt sich ein Zeitversatz von ca. 1-2 kyrs. erkennen (Abb. 32). Dieser Versatz ist erklärbar mit der damaligen Nähe zur Mündung der Jana. Der alljährliche, sommerliche

Ausstoß von leichtem Flusswasser auf den Schelf führte nicht nur zu einem zeitlich gesehen relativ längeren Eintrag von Süßwasserdiatomeen an der Oberfläche, sondern auch zu einem erhöhten Eintrag von organischen Schwebstoffen mit eindeutiger terrestrischer Signatur (C/N-Verhältnisse). Verstärkt durch sommerliche Südwinde konnte sich ein typisch ästuarines Strömungssystem aufbauen, das zudem zu einer Erhöhung des Salzgehaltes im Bodenwasser führte, verursacht durch von Norden einströmendes, salzreicheres Wasser.

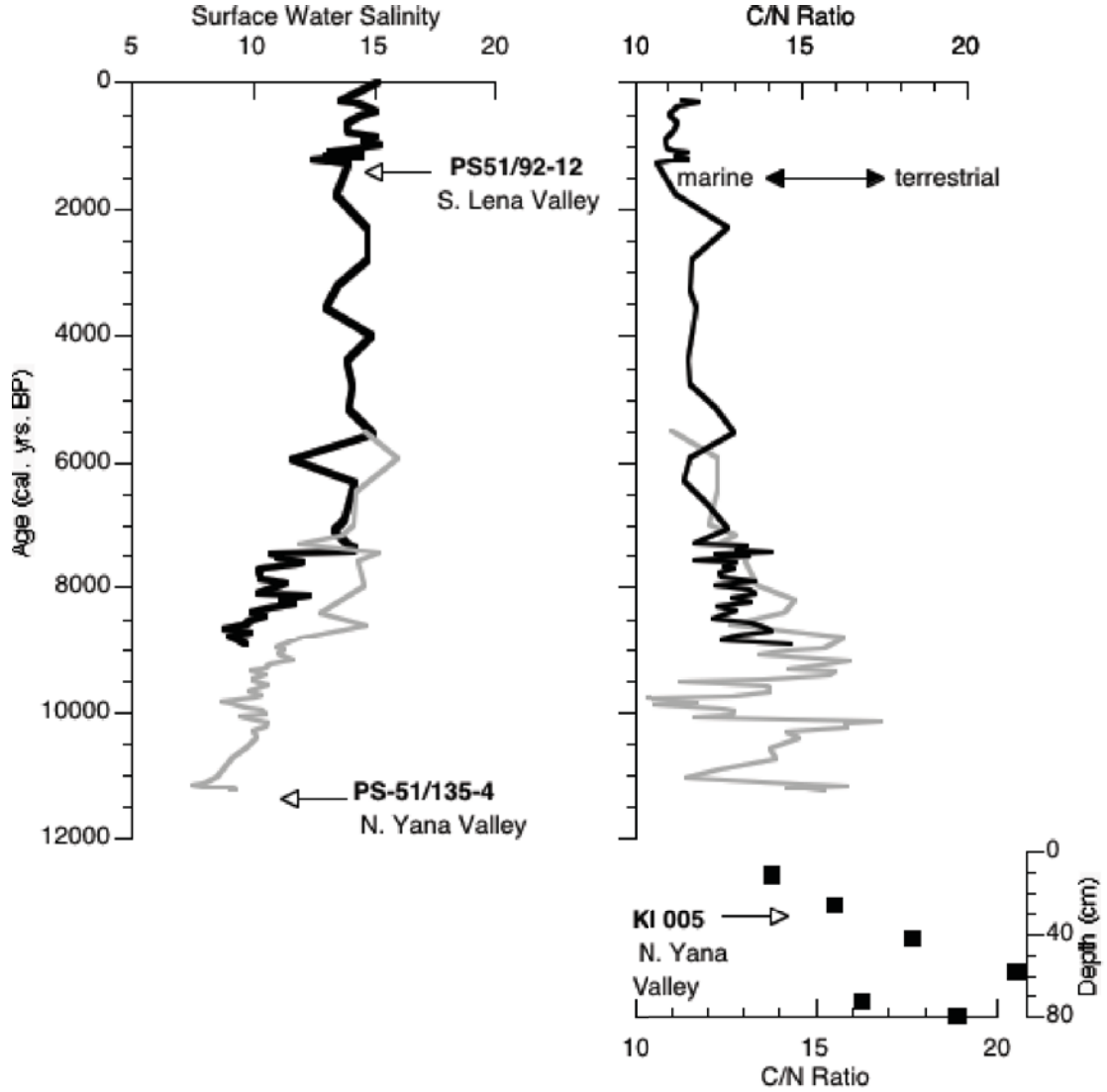

Abb. 32: Direkter Vergleich von Salinitätsrekonstruktionen auf der Basis von Diatomeen (Polyakova et al., 2005) mit den Verhältnissen von Kohlenstoff zu Stickstoff gemessen an den Sedimentkernen PS51/135 (graue Linie; 51 m Wassertiefe) und PS51/92 (schwarze Linie; 32 m Wassertiefe). Die hohen C/N-Verhältnisse zusammen mit geringen Salinitäten belegen die relative Küstennähe der Kernpositionen während der frühen Transgressionsphase. Die hohen C/N-Werte für den gezeigten Bohrkernabschnitt KI005 (Alter ca. 17.000 J. v. h.) – dieser unterliegt stratigraphisch der Position PS51/135 – belegen ein terrestrisches Ablagerungsmilieu.

Untersuchungen der Sauerstoffisotopie sowohl am Sedimentporenwasser („Polarstern"-Kerne PS51/118, 80, 154) als auch an dem *in situ* vorgefundenen Eis der Bohrungen KI002/5 offenbaren sehr deutlich den Einfluss von Süßwasser auf die Isotopenverhältnisse (Abb. 33).

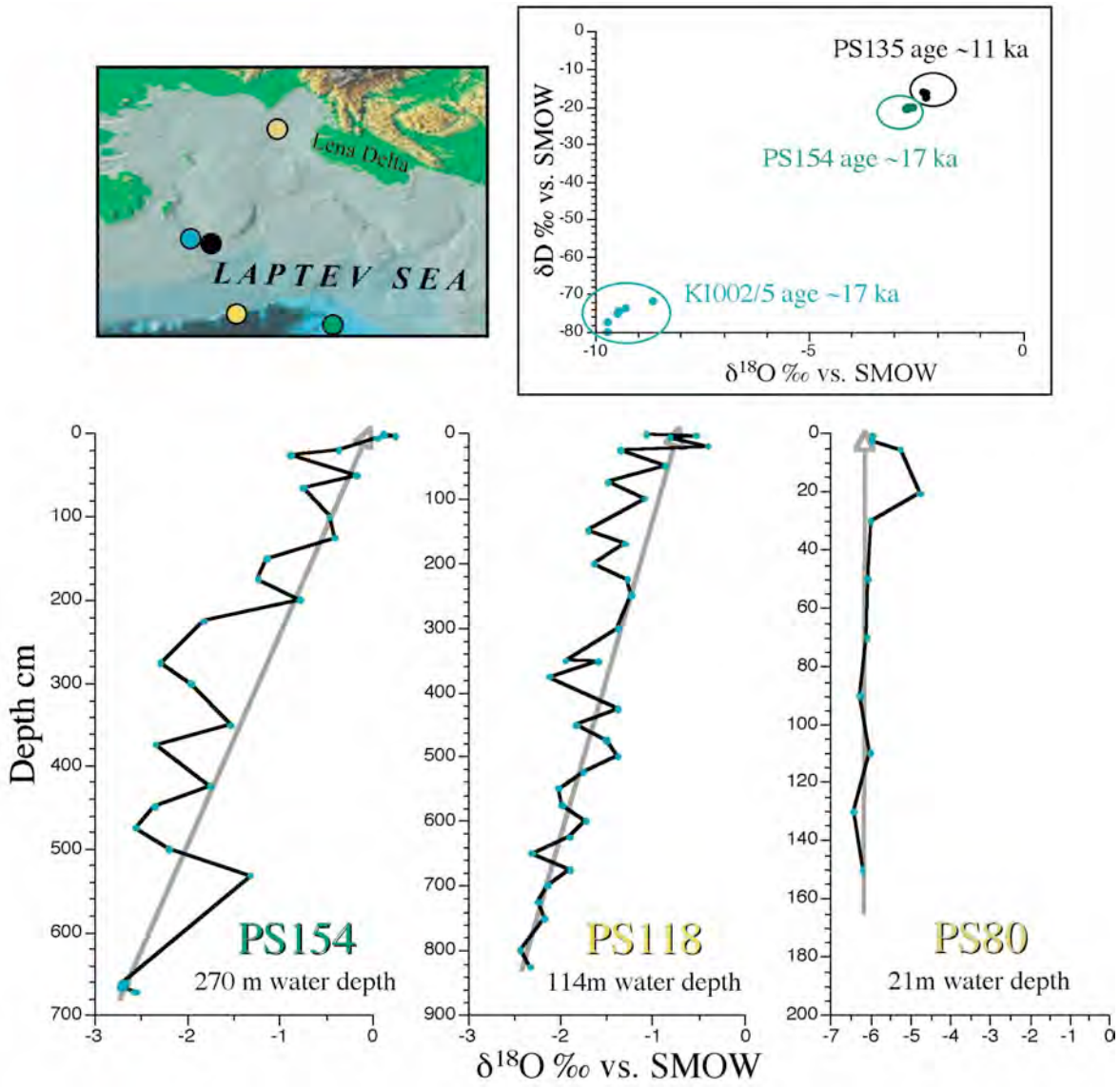

Abb. 33: Vergleich von Sauerstoffisotopen gemessen am Porenwasser von Sedimenkernen aus unterschiedlichen Regionen und Wassertiefen der Laptev-See. Die Daten aus den „Kimberlit"-Bohrungen (KI) wurden an den Eislagen analysiert und zeigen demgegenüber deutlich leichtere Isotopenwerte.

Zum einen zeigt der zeitliche Trend in den Isotopendaten, dass die ursprüngliche Signatur des Bodenwassers zumindest teilweise im Porenwasser erhalten blieb. Zum anderen belegen vor allem die sehr leichten Werte aus den Bohrungen die vorherigen Einschätzungen über die Mächtigkeit der marinen Sedimente oberhalb des submarinen Permafrostes (s. Abb. 30). Jedoch sind die Isotopenwerte von ca. -10‰ gemessen am Eis aus der Zeit vor 17 ka wesentlich schwerer als diejenigen, die im Landpermafrost für diesen Zeitraum (ca. -30‰) gemessen wurden (Meyer et al., 2002). Der signifikante Unterschied von ca. 20‰ lässt sich jedoch durch eine sekundäre, marine Überprägung während der Transgressionsphase sowie eine nachfolgende „Wiederanfrierung" des Sediments, ausgelöst durch den unterliegenden kalten Permafrost, erklären.

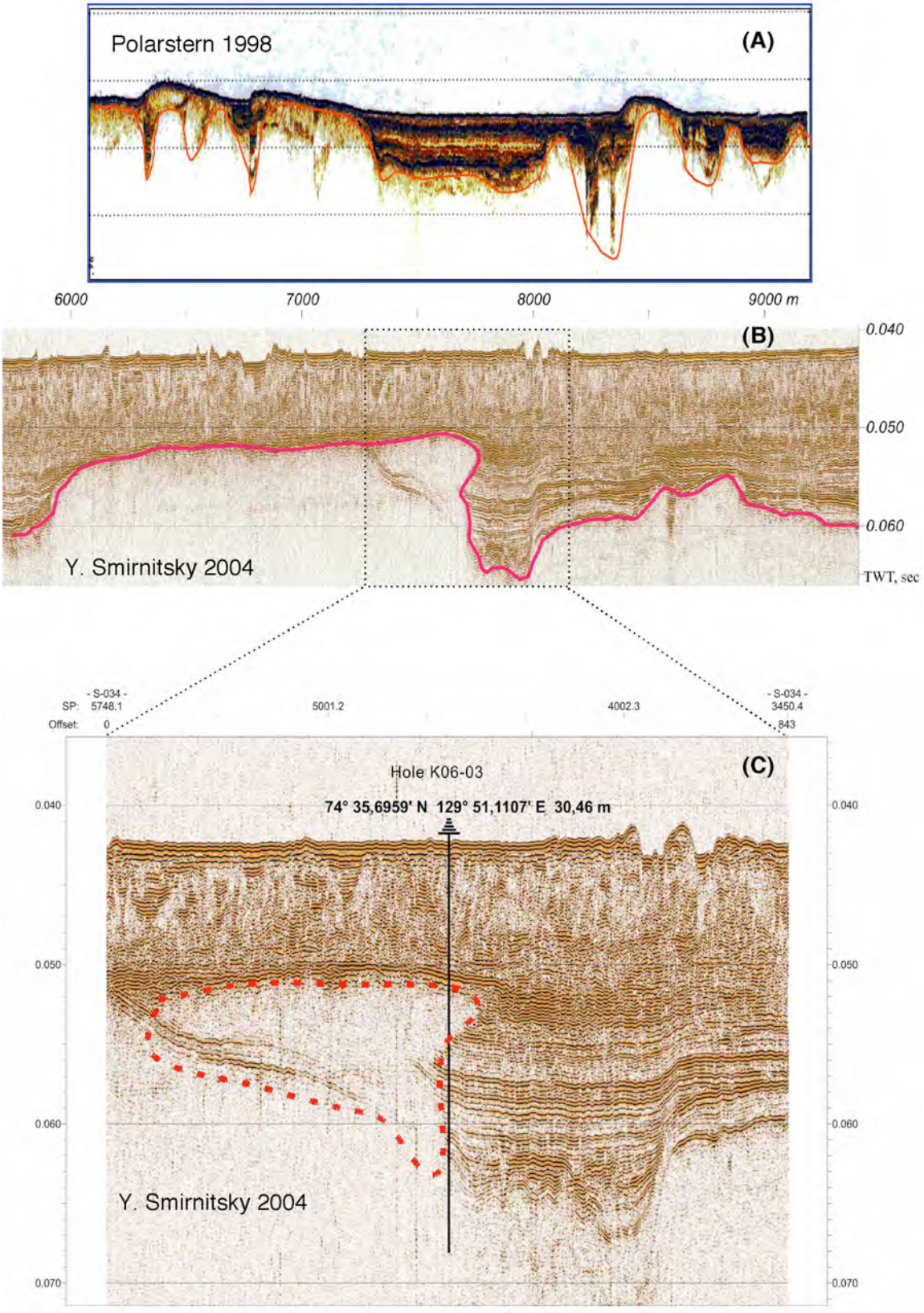

Abb. 34: Sedimentecholotdaten aus unterschiedlichen Expeditionsjahren verdeutlichen die für die östliche Laptev-See typische, dem Holozän untergelagerte Permafrostoberfläche. Position K06-03 liegt in unmittelbarer Nähe zu Sedimentkern PS51/92 (s. a. Abb. 32). Die „Semi-Transparenz" der Schichtungsstrukturen innerhalb des rotgestrichelten Bereichs (C) unterstützt die Vermutung eines post-sedimentären „Anfrierens" durch den untergelagerten kalten Permafrost.

Die neuen, hochauflösenden Echodaten aus dem Gebiet der südlichen Lena-Rinne, die während der Expedition TRANSDRIFT X 2004 an Bord von „Yakov Smirnitsky“ gewonnen werden konnten, zeigen für diese Region typische Untergrundstrukturen mit unterschiedlichen Sedimentmächtigkeiten, die als Relikt-Thermokarst interpretiert werden können (Abb. 34). Für die Position PS51/92 (s. a. Abb. 32) lassen sich ca. 15-20 m mächtige Sedimentfüllungen innerhalb von „Thermokarsterscheinungen“ erkennen. Dass diese Sedimentfüllungen nur teilweise transparent sind, kann als unterstützendes Indiz für ein postsedimentäres Anfrieren des Sediments (s. o.) gewertet werden.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die vorliegenden Ergebnisse sind schon zum Teil veröffentlich worden. Wegen der notwendigen Verschiebung der Schelfbohrung (s. o.), ausgelöst durch die ungünstigen Wetterumstände, war eine Durchführung aller Forschungsziele in dem ursprünglich geplanten Zeitraum nicht realistisch. Die neuen Ergebnisse sowie die Brisanz des Themas „Permafrost und globaler Wandel“ geben jedoch gute Gründe für die Durchführung einer Schelfbohrkampagne in der nahen Zukunft.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind keine neuen, die Durchführungen des Vorhabens beeinflussenden FE-Ergebnisse bekannt geworden.

Literatur

Meyer, H., Derevyagin, A.Yu., Siegert, C. and Hubberten, H.-W. (2002) Paleoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice. Polarforschung, 70 (1): pp. 37-51.

Polyakova, Ye.I., Bauch, H.A. and Klyuvitkina, T.S. (2005) Early to Middle Holocene changes in Laptev Sea water masses deduced from diatom and aquatic palynomorph assemblages. Global and Planetary Change, 48 (1-3): pp. 213-227.

Taldenkova, E., Bauch, H.A., Stepanova, A., Dem’yankov, S. and Ovsepyan, A. (2005) Last postglacial environmental evolution of the Laptev Sea shelf as reflected in molluscan, ostracodal and foraminiferal faunas. Global and Planetary Change, 48 (1-3): pp. 229-257.

AG 6: Seismische Feinstrukturen submariner Permafrostabfolgen

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Ziel der AG war die Abbildung des submarinen Permafrostes in der Laptev-See mit hochauflösenden seismo-akustischen Methoden. Zu diesem Zweck wurde im Sommer 2004 die Expedition TRANSDRIFT X mit FS „Yakov Smirnitsky“ durchgeführt. Trotz erheblicher Verkürzung der Expedition durch die in diesem Sommer herrschenden Eisbedingungen gelang es, auf insgesamt 42 Profilen mit einer Gesamtlänge von 1450 km Seismikdaten aufzunehmen (Abb. 35). Zum Einsatz kamen als seismische Quelle eine MiniGI-Gun (Frequenzen von 100-800 Hz) und der speziell für Expeditionen in Schelfgebieten entwickelte Bremer Flachseismikstreamer. Dieser Streamer besitzt 48 Kanäle aus Einzelhydrophonen, die auf einer Länge von 50 m verteilt sind. Parallel zur Seismik wurden mit dem russischen System Sonic M-141 Sidescan-Sonar- und Sedimentecholot-Daten (5 kHz) aufgezeichnet.

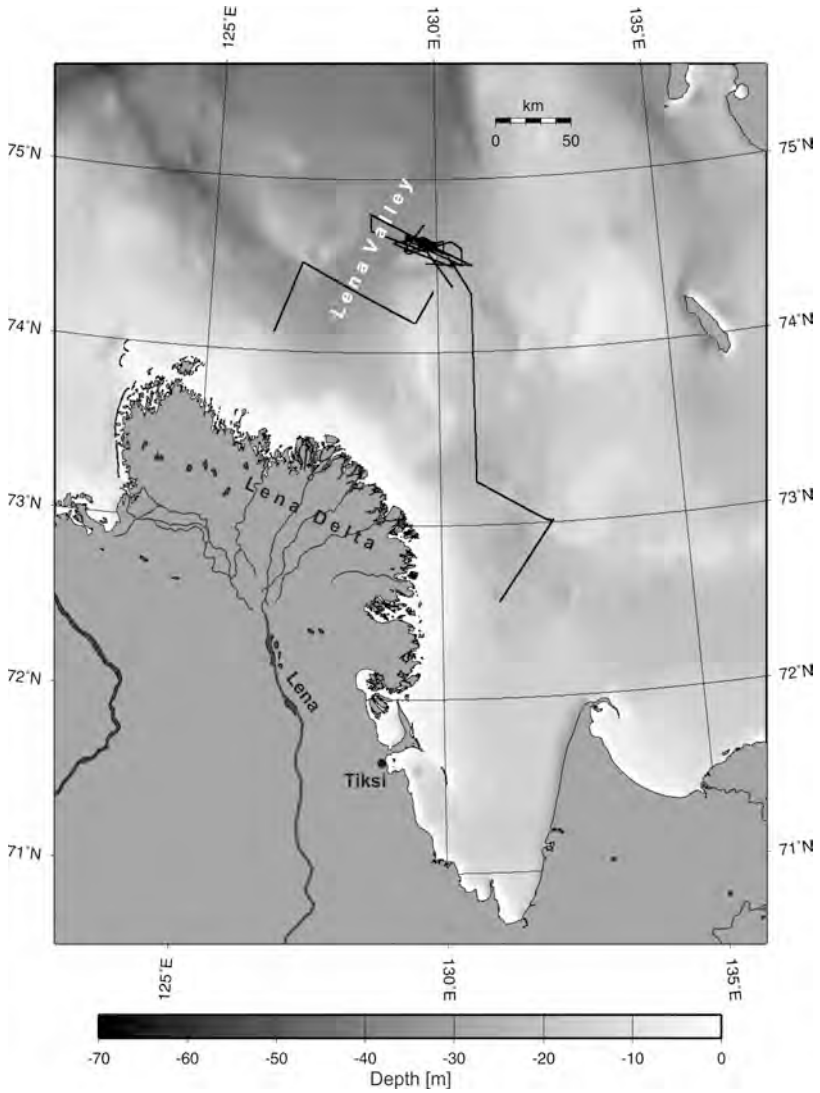

Abb. 35: Übersichtskarte seismischer Profile der Expedition TRANSDRIFT X (Bathymetrie=IBCAO).

Während der Expedition wurden sowohl lange Übersichtsprofile als auch eine kleinräumige Detailvermessung gefahren. Erstere beinhalteten ein langes Nord-Süd-Profil über den inneren Schelf sowie Profile über bathymetrische Senken, die als frühere Flusstäler angesehen wurden. Die Detailvermessung konzentrierte sich auf einen Bereich des mittleren Schelfs, in dem bei einem ersten Übersichtsprofil markante Strukturen gefunden wurden. Im Rahmen dieser Detailvermessung wurden auf mehr als 30 Profilen Daten aufgezeichnet, wobei 15 Profile mit einem Abstand von unter 200 m in das Zentrum platziert wurden, um die Strukturen auch in der Fläche zu erfassen.

Innerer Schelf

- Nord-Süd Schnitt

Die MiniGI-Gun-Daten eines langen Nord-Süd-Profils (GeoB04-002+003) vom inneren Schelf zeigen generell wenige Strukturen, was insgesamt auf einen hohen Gasanteil im Sediment hindeutet (Abb. 36).

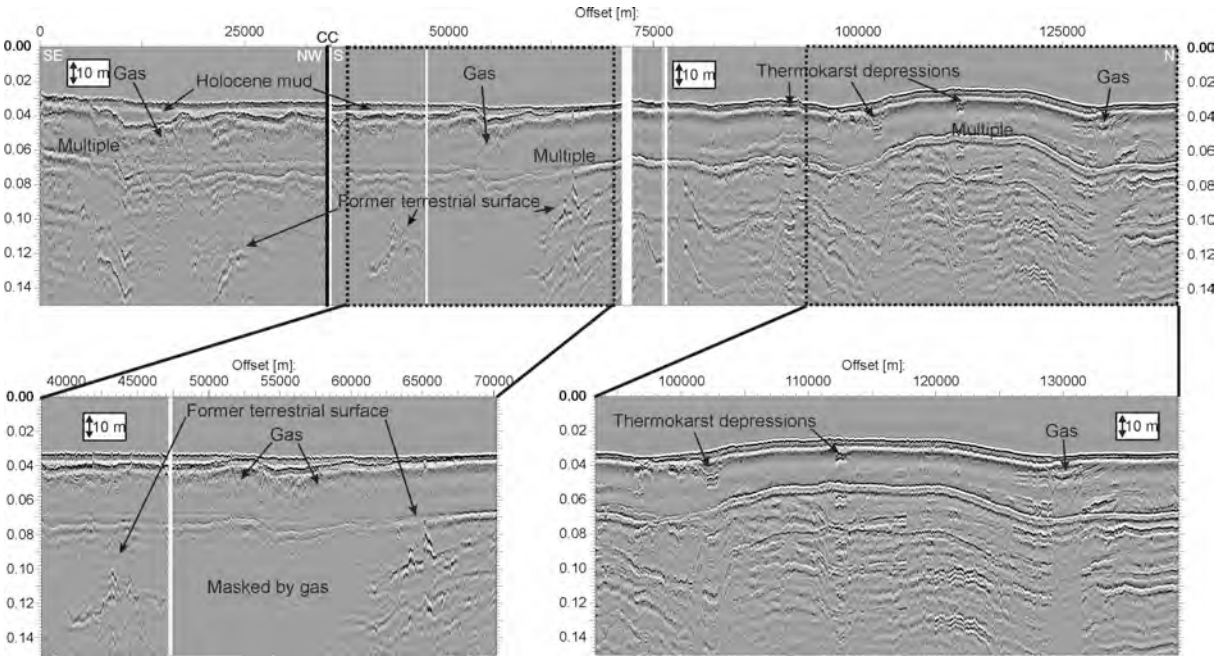

Abb. 36: Nord-Süd-Profil (GeoB04-002+003) über den inneren Schelf (s. Abb. 35). Dargestellt sind die Schusspunkte (Offset (m)) und die Zweiweglaufzeit (TWT) in Sekunden

An einigen Stellen ist das Gas anhand verschmierter Reflektoren umgekehrter Polarität deutlich zu identifizieren. Im Süden ist in den Daten ein scharfer Reflektor hoher Amplitude ca. 10 m unter dem Meeresboden zu sehen. An den Stellen, an denen dieser Reflektor den Meeresboden erreicht (Offset = 70.000 m), nimmt die Reflexionsamplitude des Meeresbodens zu. Dies ist insbesondere an der Multiple zu erkennen. Deswegen wird dieser Reflektor als

Oberkante von gefrorenen, eishaltigen Sedimenten (Permafrost) interpretiert, die die Landoberfläche vor der Transgression darstellt. Die seismische transparente Schicht oberhalb des Reflektors repräsentiert somit holozäne, marine Ablagerungen. Folglich sollten die Sedimente südlich und nördlich dieser Ablagerungen direkt unterhalb des Meeresbodens gefroren sein. Dazu sind im nördlichen Bereich einige einschnittförmige Strukturen zu identifizieren, die als Thermokarstsenken oder -seen interpretiert werden.

In tieferen Bereichen (0,04-0,1 s TWT unter dem Meeresboden, entsprechend 40-100 m unter dem Meeresboden bei einer Schallgeschwindigkeit von 2.000 m/s) ist ein unterbrochener Reflektor zu identifizieren, der durch eine starke Topographie gekennzeichnet ist. Aufgrund dieser für marine Oberflächen ungewöhnlichen Topographie kann angenommen werden, dass dieser Reflektor eine terrestrische Oberfläche darstellt, die sich während eines Meeresspiegeltiefstandes, möglicherweise in der späten Saale-Zeit, gebildet hat. Die Unterbrechungen sind wahrscheinlich Maskierungseffekte durch Gas, welches hier deutlich direkt unterhalb des Permafrost-Reflektors zu sehen ist.

- Überquerung bathymetrischer Senken

Während der Expedition TRANSDRIFT X wurden zwei lange Profile geschossen, die bathymetrische Senken überqueren, nämlich die Profile GeoB04-005 und 006.

Das Profil GeoB04-005 zeigt als prominente Struktur im Zentrum eine Störung (Abb. 37). Während am jetzigen Meeresboden nur eine kleine Stufe von etwa 2 m vorhanden ist, zeigen sowohl der ursprüngliche Meeresboden als auch ein tiefer liegender Reflektor einen Versatz von ungefähr 15 m. In der dadurch entstandenen Senke, die im Profilschnitt keilförmig erscheint und quasi als Falle wirkt, haben sich dann während bzw. nach der Transgression holozäne, marine Sedimente abgelagert, die im Seismogramm als keilförmiger, nahezu transparenter Körper erscheinen. Besonders interessant erscheint innerhalb dieses Körpers eine diffuse Reflexion, die direkt über der nahezu senkrechten Störungsebene liegt. Diese Reflexion stellt höchstwahrscheinlich eine Aufstiegsstruktur da, die Material (Schlamm und/ oder Gas) repräsentiert, welches an der Störung entlang von unteren Bereichen aufsteigt.

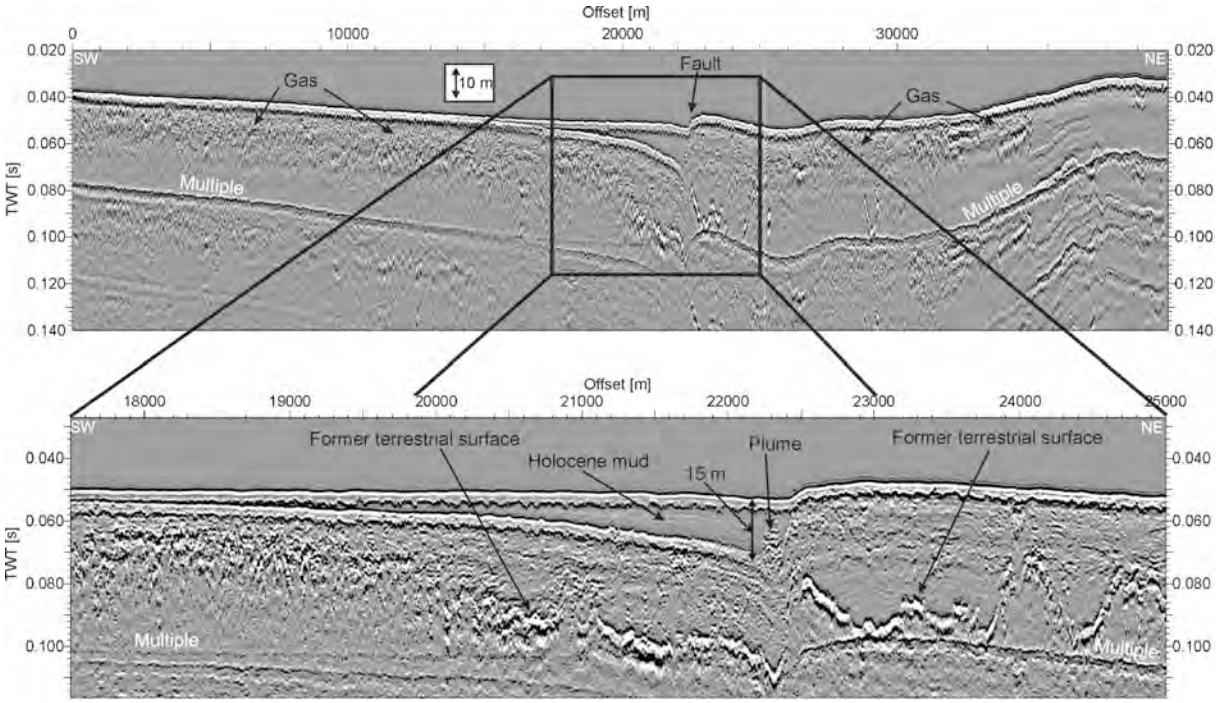

Abb. 37: Profil GeoB04-005 (Lage s. Abb. 35) kreuzt eine Störung, in deren Folge eine keilförmige Senke entstanden ist, die mit holozänen marinen Sedimenten aufgefüllt wurde.

Das anschließende Profil GeoB04-006 (Abb. 38) überquert von NW nach SE eine nordöstlich streichende Senke, die als früheres Flusstal der Lena bezeichnet wird. Im östlichen Bereich der Senke ist unter dem Meeresboden deutlich ein ausgeprägter Reflektor mit charakteristischem Relief und hoher Reflexionsamplitude zu sehen. Dieser Reflektor verschmiert Richtung Westen, wo er durch eine seismisch fast transparente Zone unterbrochen wird, um schließlich an der Kante der westlichen Bank abrupt zu enden. Richtung Osten erreicht der Reflektor den Meeresboden an der Kante der östlichen Bank, womit eine Erhöhung der Reflexionsamplitude des Meeresbodens einhergeht. Auf der Bank sind einige kleinere Strukturen direkt unterhalb des Meeresbodens erkennbar. Unterhalb des beschriebenen Reflektors erscheint der Untergrund nahezu seismisch transparent, allerdings sind Bruchstücke eines tieferen Reflektors zu erkennen, der ebenfalls durch eine starke Topographie charakterisiert ist.

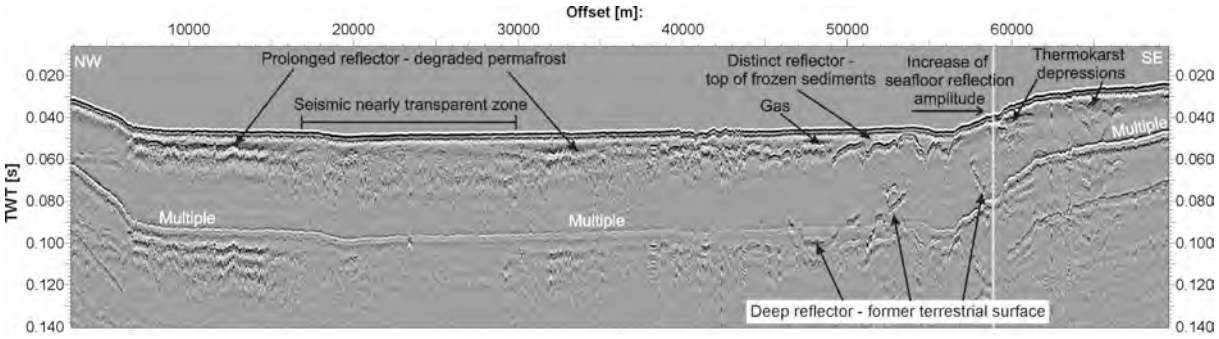

Abb. 38: Profile GeoB04-006 zeigt die Überquerung einer Senke (s. Abb. 35).

Das Relief des ausgeprägten Reflektors ähnelt stark dem Relief des Thermokarstes, wie man ihn heute an Land in der sibirischen Küstenlandschaft findet. Dies führt zusammen mit der hohen Reflexionsamplitude und der seismischen Transparenz unterhalb zu dem Schluss, dass der Reflektor die Oberkante gefrorener Sedimente, also den submarinen Permafrost, abbildet und gleichzeitig die Landschaftsform vor der Transgression darstellt. Somit sollte der Permafrost auf der östlichen Bank unmittelbar unterhalb des Meeresbodens anstehen, unterbrochen durch die als gefüllte Thermokarstsenken interpretierten Strukturen. Die Verschmierung des ausgeprägten Reflektors Richtung Westen innerhalb der Senke wird folglich interpretiert als Destabilisierung des Permafrostes, möglicherweise einhergehend mit dem Vorkommen von freiem Gas im Sediment. Dies gilt insbesondere in dem Bereich, wo der verschmierte Reflektor durch eine transparente Zone unterbrochen ist.

In beiden Profilen, GeoB04-005 und GeoB04-006, stellt der tiefere Reflektor aufgrund der Topographie wahrscheinlich eine frühere terrestrische Oberfläche dar und scheint ein Äquivalent des tieferen Reflektors vom südlichen Schelf zu sein.

Als weiteres Ergebnis ist festzuhalten, dass weder auf Profil GeoB04-005 noch auf Profil GeoB04-006 Anzeichen eines früheren Flussverlaufes zu identifizieren sind. Von dem äußeren Schelf ist bekannt, dass diese deutlich als verfüllte, postsedimentäre Einschnitte in akustischen Daten (Parasound) hervortreten, und zwar wenige Meter unter dem Meeresboden. Somit sollten solche Strukturen auch in den Bereichen, in denen Gas tiefere Strukturen maskiert, sichtbar sein. Das Fehlen dieser Strukturen führt zu dem Schluss, dass die Senken in den Bereichen der Profile der Expedition TRANSDRIFT X keine ehemaligen Flusstäler darstellen.

Hauptarbeitsgebiet

Das Hauptarbeitsgebiet liegt auf dem mittleren Schelf in Wassertiefen zwischen 15 und 40 m, wobei sich die flachen Wassertiefen im südöstlichen Bereich befinden und als eine Bank/ Untiefe mit nordwestlich fallender Flanke darstellen (Abb. 39). Die tieferen Bereiche sind Teil der bathymetrischen Senke, die als ehemaliges Flusstal der Lena bezeichnet wird (s. auch Abb. 35).

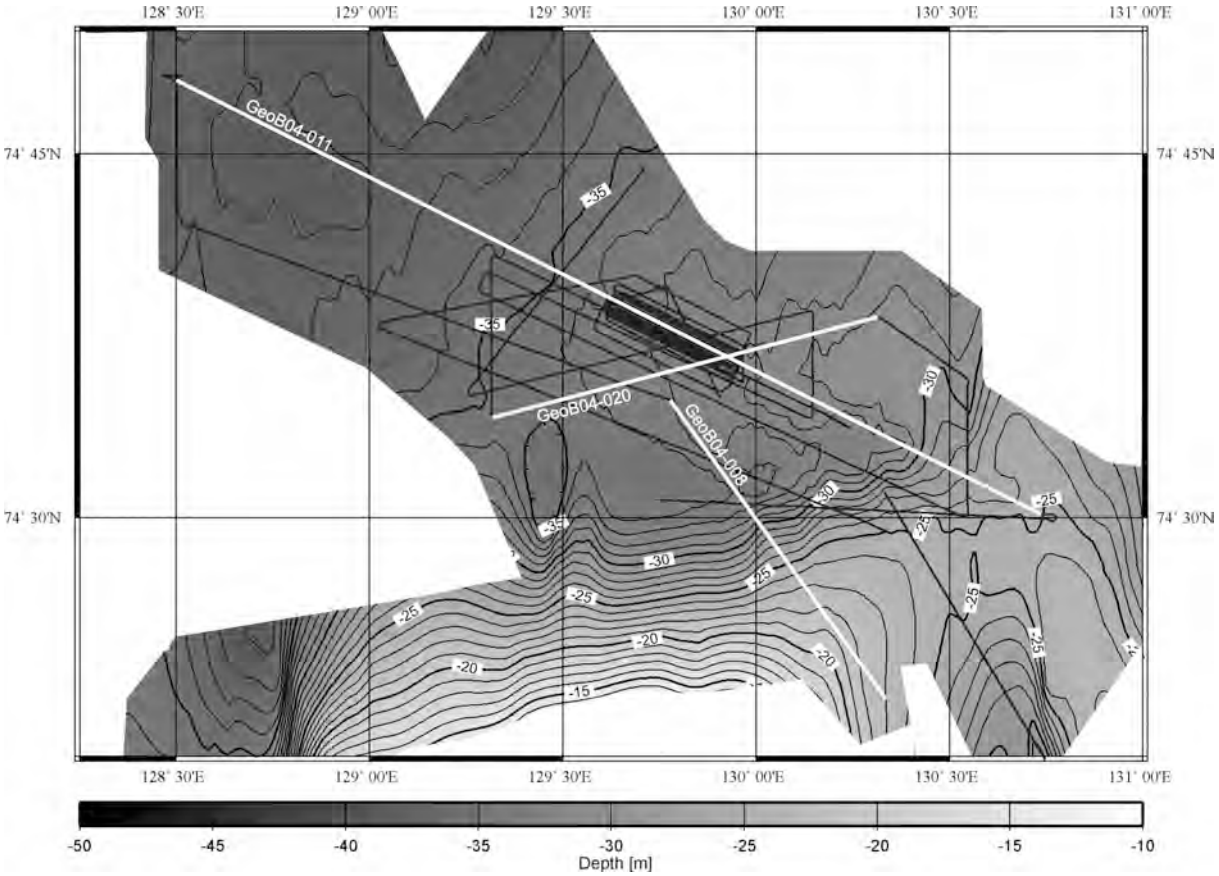

Abb. 39: Bathymetrie des Hauptarbeitsgebietes und Lage der seismischen Profile.

➢ Seismische Fazies im Arbeitsgebiet

Das Übersichtsprofil GeoB04-011, welches das Arbeitsgebiet von NW nach SE kreuzt, zeigt drei generelle seismische Fazies (Abb. 40):

- Im Westen ist ungefähr 10 m unter dem Meeresboden ein verschmierter Reflektor sichtbar, darunter sind keine Strukturen zu identifizieren.
- Im Zentrum des Profils ändert sich dieser verschmierte Reflektor zu einem ausgeprägten Reflektor hoher Amplitude, der ein deutliches Relief mit Senken von bis zu 20 m Tiefe und bis zu 2 km Breite zeigt. Teilweise sind in den Senken horizontale, parallele Reflektoren auszumachen. Der Reflektor ist mehrfach, meistens im Bereich der Senken, durch Zonen diffuser Reflektionen unterbrochen. Ober- und unterhalb dieses Reflektors erscheint der Untergrund seismisch transparent, unterhalb ist nur an einigen wenigen Stellen bruchstückhaft ein tieferer Reflektor zu erkennen.
- Im Osten kommt der ausgeprägte Reflektor am Fuß der Untiefe an den Meeresboden, einhergehend mit einer Erhöhung der Reflexionsamplitude des Meeresbodens. Östlich von diesem Punkt zeichnet sich der Untergrund der Untiefe durch parallele Reflektoren aus.

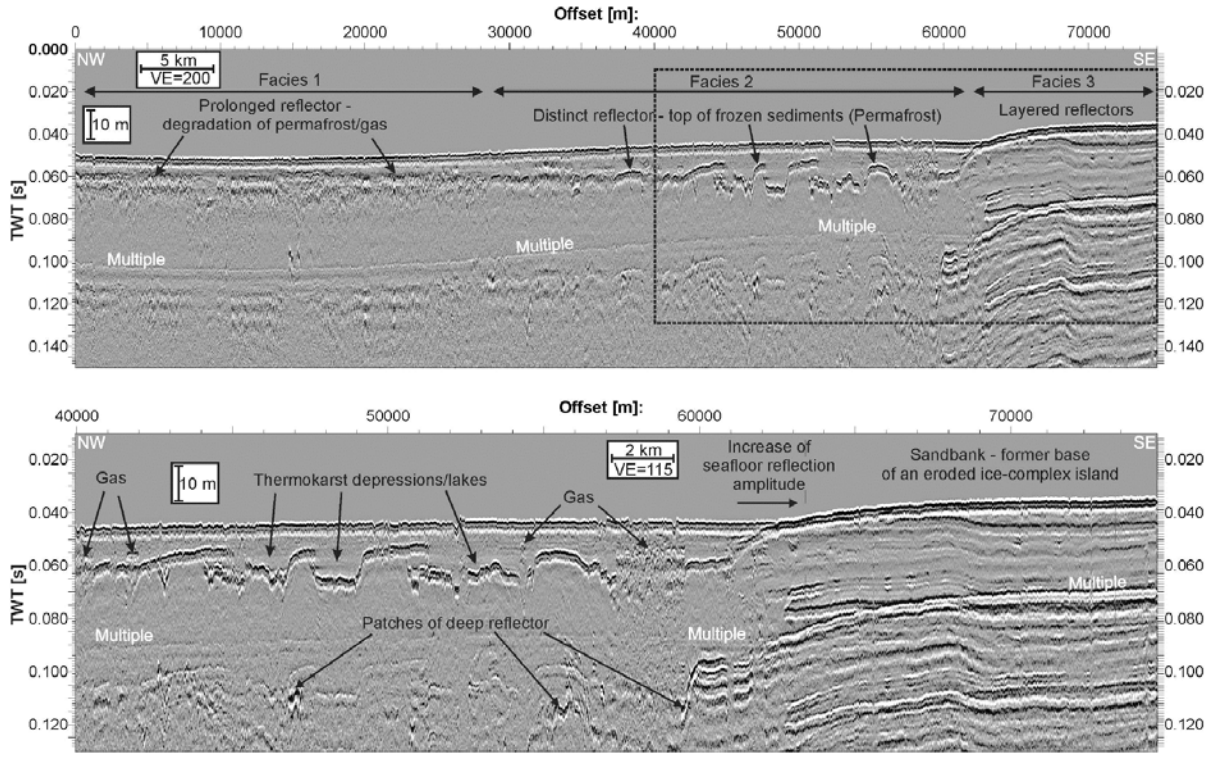

Abb. 40: Profil GeoB04-011 kreuzt das Hauptarbeitsgebiet von NW nach SE und zeigt die 3 seismischen Fazies im Arbeitsgebiet. Oben: Gesamtes Profil. Unten: Ausschnittvergrößerung (s. Kasten im oberen Teil).

Zwei weitere Profile zeigen partiell die gleichen Strukturen. Profil GeoB04-008 (Abb. 41) verläuft auch über den Übergang von der Senke zur Untiefe und zeigt im Bereich der Senke den ausgeprägten Reflektor hoher Amplitude mit charakteristischem Relief. Im Bereich der Untiefe ist auch hier der Untergrund durch parallele Reflektoren abgebildet, und die Reflexionsamplitude des Meeresbodens ist signifikant erhöht. Insbesondere ist aber auch auf diesem Profil der tiefere Reflektor in größeren Stücken sichtbar, und es zeigt sich, dass dieser Reflektor eine vergleichsweise starke Topographie aufweist.

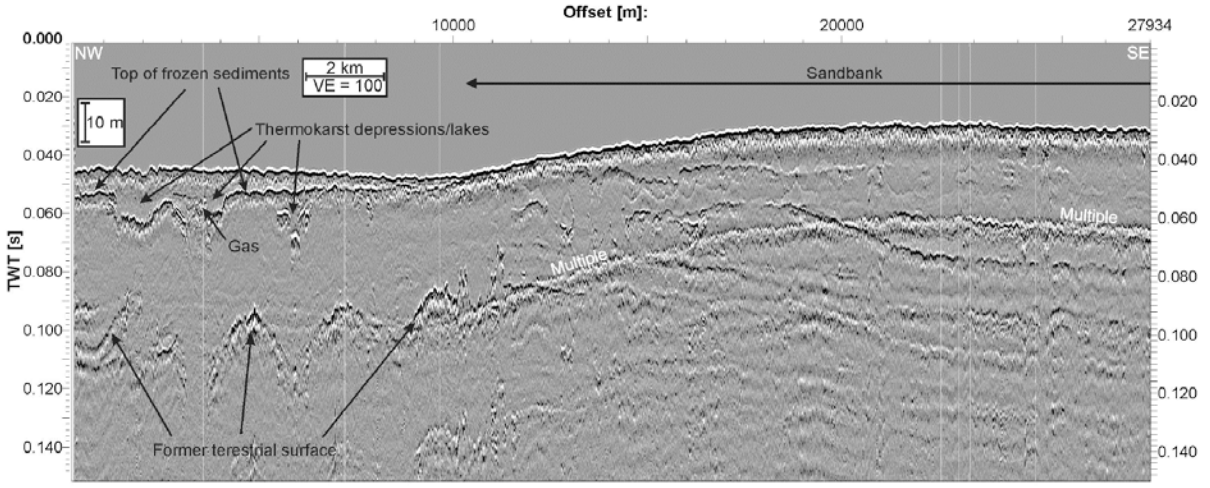

Abb. 41: Profil GeoB04-008 zeigt den Übergang von der Sandbank zur Senke und eine tiefer vergrabene frühere Landoberfläche.

Dies ist auch deutlich im Profil GeoB04-020 (Abb. 42) zu sehen, welches das Profil GeoB04-011 im Zentrum des Arbeitsgebietes kreuzt (s. Abb. 39).

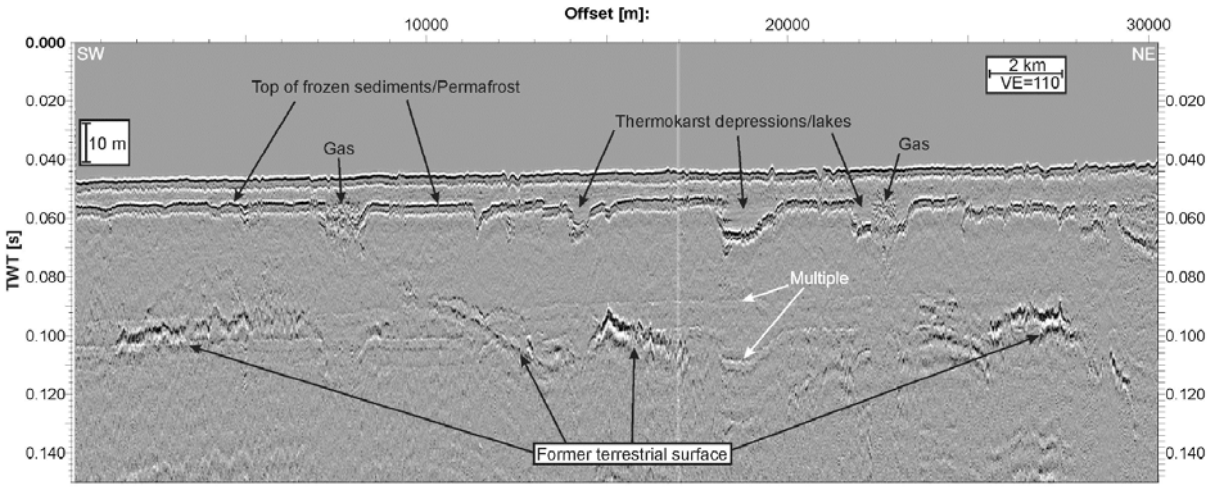

Abb. 42: Profil GeoB04-020 zeigt deutlich die Oberkante des submarinen Permafrostes und ihre Ähnlichkeit zum Thermokarstterrain sowie eine ältere Landoberfläche.

➢ Oberkante des submarinen Permafrostes

Wie in den Profilschnitten zu sehen, ist der prägnante Reflektor im Zentrum des Arbeitsgebietes durch eine hohe Reflexionsamplitude und ein Relief gekennzeichnet, welches an das Thermokarstterrain der sibirischen Küstenlandschaft erinnert. Die Kartierung dieses Reflektors im Bereich der Detailvermessung zeigt nun auch, dass die Senken eine runde bis längliche Form haben, ähnlich den Thermokarstseen an Land (Abb. 43). Somit interpretieren wir den genannten Reflektor als Oberkante des (noch) gefrorenen Sediments bzw. des stabilen submarinen Permafrostes. Diese Oberkante stellt somit auch den Prä-Transgressions-Thermokarst inklusive Thermokarstseen dar. Die parallelen Reflektoren innerhalb der Senken repräsentieren dann lakustrine Sedimente, oberhalb derer marine Sedimente nach der Transgression abgelagert wurden.

Im Osten erreicht die Oberkante des Permafrostes den Meeresboden (s. Abb. 41 und 42), somit sollten im Bereich der Untiefe die Sedimente unmittelbar unterhalb des Meeresbodens gefroren sein. Dies wird auch durch die Zunahme der Reflexionsamplitude des Meeresbodens suggeriert. Dass hier trotzdem eine Schichtung des Untergrundes erkennbar ist, zeigt, dass die seismische Transparenz unterhalb des Permafrostreflektors im Bereich der Senke nicht dadurch verursacht wird, dass der Reflektor sämtliche Energie zurückreflektiert. Vielmehr deutet es darauf hin, dass die Sedimente durch einen höheren Eisgehalt hier seismisch homo-

gen wirken, während im Bereich der Untiefe der Eisgehalt nicht ausreicht, um dies zu bewirken. Letztendlich deuten die Unterschiede in der seismischen Signatur auf unterschiedliche Lithologien hin. Da tonige Sedimente einen größeren Porenraum besitzen und somit einen höheren Eisgehalt als Sand haben können, werden die Sedimente im Bereich der Senke als tonig interpretiert, während die Untiefe wahrscheinlich eine Sandbank darstellt. Diese Sandbank könnte früher die Basis einer Eiskomplex-Insel gewesen sein, die aber mittlerweile vollkommen erodiert ist.

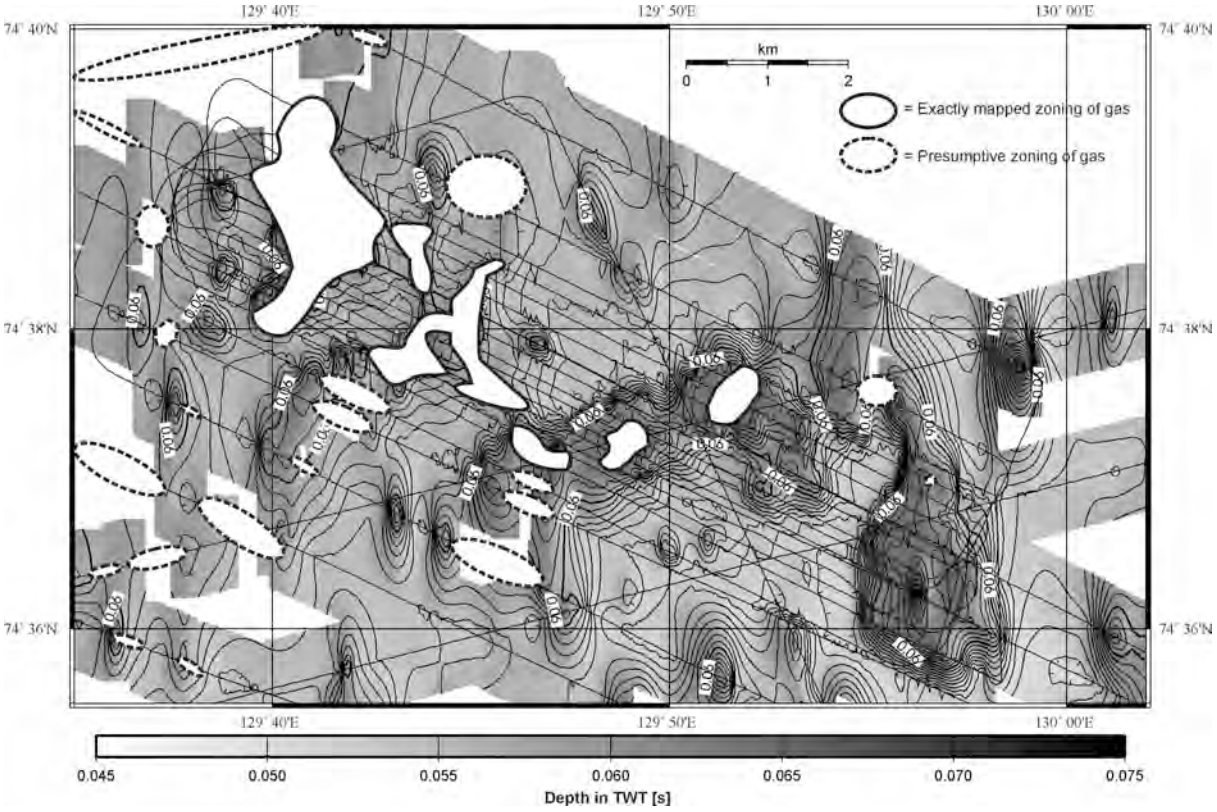

Abb. 43: Kartierung der Oberkante des submarinen Permafrostes sowie des Gasvorkommens im Hauptarbeitsgebiet.

➢ Gasverteilung im Arbeitgebiet

Der die Oberkante der gefrorenen Sedimente repräsentierende Reflektor ist an mehreren Stellen durch diffuse Reflektionen unterbrochen, die durch Phasenumkehr gekennzeichnet sind. Dies deutet darauf hin, dass diese diffusen Reflektionen als das Vorhandensein von Gas interpretiert werden können. Sowohl die Profile selbst als auch die gemeinsame Kartierung der Oberkante des Permafrostes und des Gases zeigen, dass das Gas größtenteils oberhalb von Senken des Permafrostes zu finden ist (vgl. Abb. 40, 41, 42 und 43). Anders gesagt, das Gas befindet sich in den Sedimenten oberhalb früherer Thermokarstseen. Dies könnte dadurch

erklärt werden, dass sich unterhalb der Thermokarstseen Taliks gebildet hatten, die die Freisetzung von Gas aus dem Boden ermöglich haben.

Die Verschmierung des Reflektors im westlichen Bereich des Gebietes wird konsequenterweise als Destabilisierung des Permafrostes gedeutet. Teilweise ist zu erkennen, dass der verschmierte Reflektor einen Phasenwechsel zeigt, und zusammen mit der totalen Maskierung des Untergrundes führt dies zu dem Schluss, dass auch hier freies Gas im Sediment vorhanden ist. Somit ist nicht ganz klar, ob der verschmierte Reflektor den Abbau des Permafrostes oder die Existenz von Gas zeigt, wahrscheinlich aber ein Zusammenspiel beider Faktoren. Die Destabilisierung des Permafrostes wird vermutlich durch den Kontakt mit Seewasser verursacht, welches ein Auftauen des Untergrundes bewirkt (vgl. AG 4). Zusammenfassend zeigt sich, dass in signifikanten Bereichen des Arbeitsgebietes die Oberkante des Permafrostes instabil und ein Freisetzen von Gasen möglich ist.

- Ältere Landoberfläche

Wie in den Übersichtsprofilen vom inneren Schelf wurde auch im Hauptarbeitsgebiet ein markanter tieferer Reflektor identifiziert. Allerdings ist auch hier der Reflektor nur bruchstückhaft vorhanden, wahrscheinlich durch Maskierungseffekte durch Gas im darüberliegenden Sediment. Die Tiefe dieses Reflektors liegt durchschnittlich bei ~50 m unterhalb des Meeresbodens. Der Reflektor zeichnet sich durch ein vergleichsweise starkes Relief aus, an einigen Stellen von bis zu 25 m Tiefendifferenz auf 2 km Entfernung (Abb. 44). Aufgrund dieser Charakteristik wird angenommen, dass dieser Reflektor eine frühere Landoberfläche darstellt und ein Äquivalent zu dem tieferen Reflektor vom inneren Schelf ist. Die Tiefe von mindestens 80 bis 100 m unterhalb des heutigen Meeresspiegels suggeriert, dass diese Landoberfläche während der späten Saale-Zeit gebildet wurde (Isotopenstadium 6), als der Meeresspiegel ähnlich tief war wie während des letzten glazialen Maximums.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Expedition TRANSDRIFT X wurden hochauflösende Mehrkanalseismik-Daten auf längeren Übersichtsprofilen und während einer Detailvermessung gesammelt. Die Übersichtsprofile vom südlichen Schelf zeigen generell wenige Strukturen, was auf das Vorkommen von Gas hindeutet. Ein tieferer Reflektor mit steilem Relief wird als ehemalige Landoberfläche interpretiert. Im westlichsten Profil wurde eine Störung überlaufen, die offensichtlich eine Wegsamkeit für aufsteigendes Material oder Gas darstellt. In den Profilen, die

bathymetrische Senken überlaufen, wurden keine Fluss- oder Kanalstrukturen identifiziert, so dass diese Senken vermutlich keine früheren Flusstäler repräsentieren.

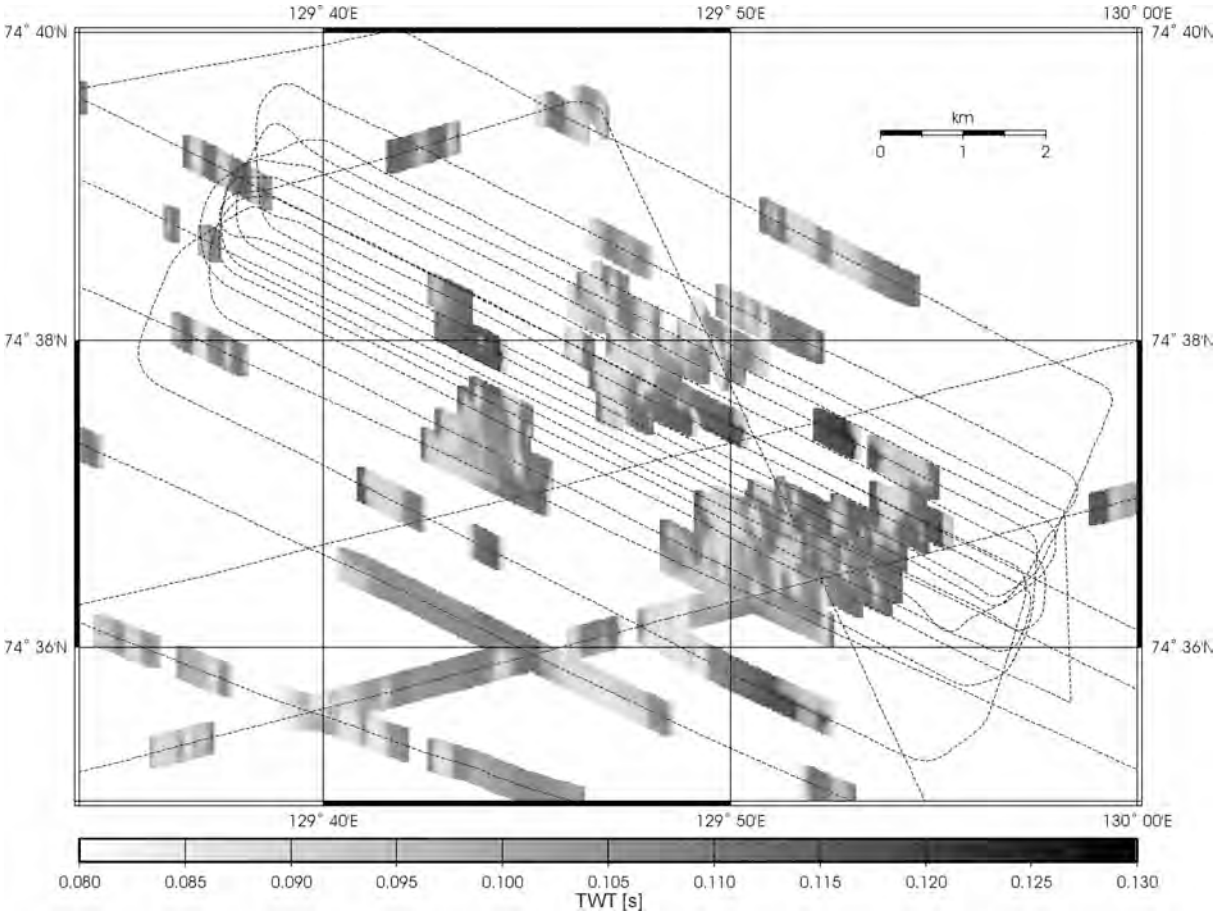

Abb. 44: Kartierung der älteren Landoberfläche im Hauptarbeitsgebiet.

Im Hauptarbeitsgebiet wurden 3 Fazies gefunden und interpretiert:

- Ein ausgeprägter Reflektor hoher Amplitude, dessen Relief dem Thermokarst an Land stark ähnelt, wird als Oberkante des submarinen Permafrostes angesehen.
- Im Westen des Arbeitsgebietes erscheint dieser Reflektor verschmiert, wahrscheinlich aufgrund von Auflösungsprozessen und dem Vorkommen von Gas.
- Im Osten im Bereich einer Untiefe wird der Untergrund durch parallele Reflektoren charakterisiert. Diese Untiefe wird als Sandbank interpretiert, die die frühere Basis einer mittlerweile erodierten Eiskomplex-Insel repräsentiert.

Es zeigt sich weiterhin, dass Gas in kleinen, isolierten Bereichen oberhalb der Senken in der Oberkante des submarinen Permafrostes vorkommt. Auch im Hauptarbeitsgebiet wurde unterhalb der Oberkante des Permafrostes eine frühere Landoberfläche identifiziert.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden im Rahmen von internationalen Tagungen (AGU 2004, EUCOP 2005, AGU 2005) veröffentlicht. Publikationen in internationalen Fachzeitschriften sind in Arbeit. Ein weiteres Ziel der Interpretation der seismischen Daten war die Bestimmung von geeigneten Bohrlokationen. Dies ist im Sommer 2005 in Abstimmung mit allen Beteiligten erfolgt. Die geplante Bohrkampagne ist aus wettertechnischen Gründen ausgefallen, aber die entwickelte Bohrstrategie kann natürlich nach wie vor realisiert werden.

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Es sind keine für die Durchführung des Vorhabens relevanten Ergebnisse bekannt geworden.

AG 7: Rezente Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Im Mittelpunkt des Arbeitsprogramms stand die Charakterisierung von Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes. Die Bedeutung des Salzgehaltes und der Temperatur im Bodenwasser (Vigdorchik, 1980; Gosink and Baker, 1990) und die der hydrodynamischen Bedingungen (Taylor and Allen, 1987; Hutter and Straughan, 1999) für die Stabilität der Obergrenze des submarinen Permafrostes wurde durch bisherige Studien hervorgehoben. Deshalb wurden hydrodynamische Prozesse und ihre saisonale Variabilität im inneren Schelfgebiet ermittelt und ihre Wechselwirkungen mit dem submarinen Permafrost entschlüsselt. Während der Schiffsexpedition TRANSDRIFT IX im September 2003 wurden zusammen mit AG 1 und 4 und den russischen Partnern vom AARI, LDR und OSL zwei Meeresbodenobservatorien für langfristige Prozessstudien ausgesetzt, die während der Schiffsexpedition TRANSDRIFT X im September 2004 zusammen mit den russischen Partnern vom AARI und OSL teilweise wieder geborgen wurden. Für den Zeitraum September 2003 bis September 2004 wurden durch den russischen Projektpartner (AARI) alle drei Stunden die meteorologischen Daten (Windrichtung und -geschwindigkeit, Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck) an der Station Dunay im nördlichen Lena-Delta und auf Kotelny erfasst, um den atmosphärischen Einfluss auf den Wasserkörper und seine Wechselwirkungen mit dem submarinen Permafrost zu ermitteln. Satellitenbilder vom Bereich der Meeresbodenobservatorien standen im Rahmen eines ENVISAT-Projektes („Formation, Transport and Distribution of Sediment-Laden Ice in the Arctic Shelf Seas“, ID 500) für den Zeitraum November 2003 bis September 2004 alle zwei bis drei Tage zur Verfügung, die zusammen mit Christian Haas, AWI, bezüglich des Eisregimes über den Meeresbodenobservatorien ausgewertet wurden. Es liegt nun ein neuartiger, umfangreicher Datensatz über die jahreszeitlichen Schwankungen in den Bodenwassertemperaturen, über die hydrodynamischen Bedingungen und die äußeren Randbedingungen (Wind und Eisregime) auf dem inneren Schelf nördlich des Lena-Deltas vor, der Aussagen über die rezenten Stabilitätsfaktoren des submarinen Permafrostes ermöglicht.

Besonders der Datensatz der Bodenwassertemperaturen zeigt überraschende Schwankungen, die in dieser Weise noch nicht aufgezeichnet wurden (Abb. 45b). Gegen Ende des Sommers wurden ein Temperaturmaximum im Bodenwasser von 2,77°C und eine Standardabweichung der Bodenwassertemperaturen im Sommer von s=0,86 gemessen. Sowohl das Temperaturmaximum als auch die Standardabweichung liegen weit außerhalb der bisher

gemessenen Bereiche (Dmitrenko et al., 2001). Um festzustellen, ob nur aufgrund von fehlenden kontinuierlichen Messungen während der Expeditionen solche Temperaturschwankungen im Bodenwasser auf dem Laptev-See-Schelf nicht registriert wurden, wurden die Datensätze der innerhalb des Vorgängerprojektes „System Laptev-See 2000“ ausgebrachten Meeresbodenobservatorien daraufhin erneut ausgewertet. Auf dem inneren Schelf östlich des Lena-Deltas wurde ebenfalls gegen Ende des Sommers ein Temperaturmaximum im Bodenwasser aufgezeichnet. Das Temperaturmaximum von 0,01°C liegt genau wie die Standardabweichung der Bodenwassertemperaturen von s=0,26 im Bereich der bisher aufgezeichneten Bereiche (Abb. 45a; Dmitrenko et al., 2001).

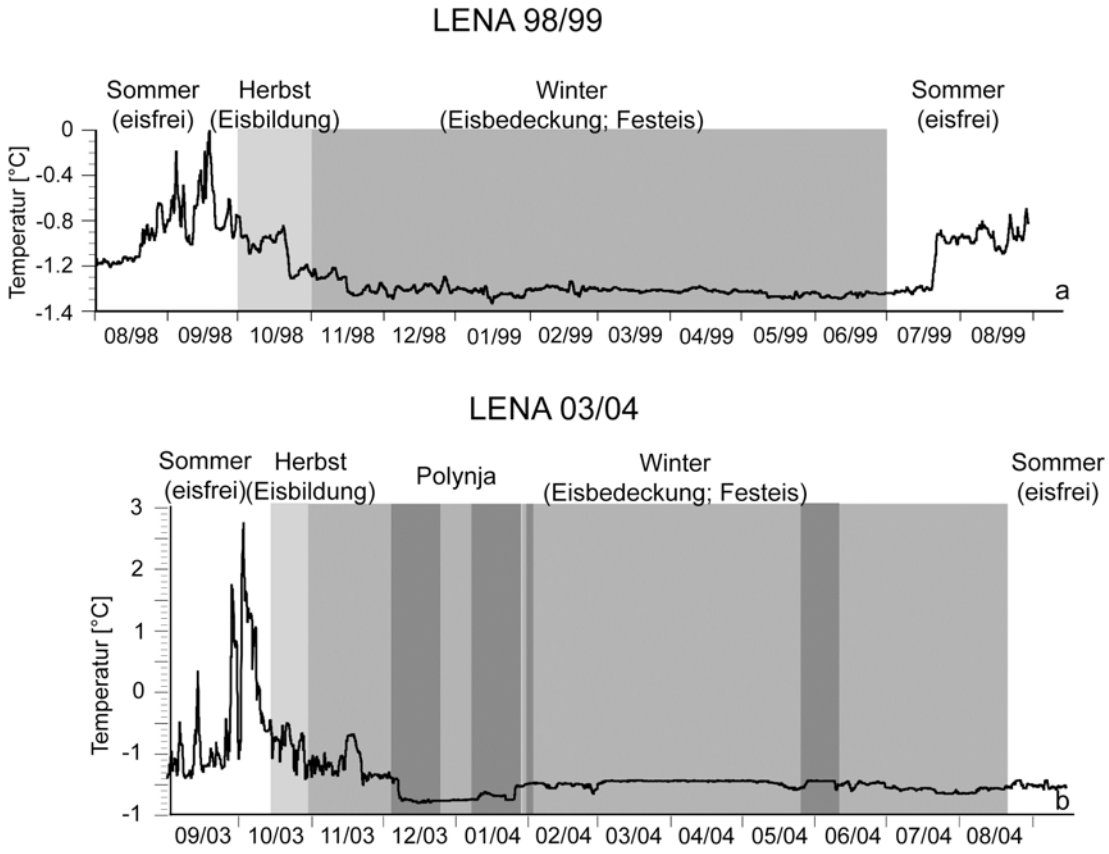

Abb. 45: Bodenwassertemperaturen [°C] an der Station LENA 98 (73°27,37N 131°41,98E; a) von August 1998 bis August 1999 und an der Station LENA 03 (74°07,02N 126°25,3E; b) von September 2003 bis September 2004.

Im Bereich des Frontensystems zwischen dem Süßwasserausstrom des Lena und dem Schelfwasser der Laptev-See, in dem sowohl LENA 98 als auch LENA 03 verankert wurden, kommt es zur Ausbildung eines intermediären Temperaturmaximums, einer Wasserlage mit erhöhter Wassertemperatur, erhöhtem Salzgehalt, einem Minimum in gelöstem Silikat und erhöhten Sauerstoff- und Chlorophyllwerten (z. B. Dmitrenko et al., 1998, 1999). Dieses intermediäre Temperaturmaximum weist dieselbe Dichte auf wie das Oberflächenwasser der west-

lichen Laptev-See. Das nach dem Abschmelzen des Meereises erwärmte Oberflächenwasser der westlichen Laptev-See schichtet sich entlang von Isopyknen unter die Flusswasserlinse der Lena. Der Wärmeaustausch dieses Warmwasserkörpers mit dem Oberflächenwasser kann zu einer Verzögerung der Meereisbildung führen (z. B. Dmitrenko et al., 1999; Kirillov et al., 2002). Die Auswirkung des intermediären Temperaturmaximums auf die Bodenwassertemperaturen und damit auf die Stabilität des submarinen Permafrostes ist bisher jedoch noch unbekannt. Während der TRANSDRIFT-IX-Expedition wurde oberhalb der Bodenstation solch ein intermediäres Temperaturmaximum gemessen, das Temperaturen von bis zu 5,3°C erreichte (Wegner et al., 2004). Das in beiden Meeresbodenobservatorien aufgezeichnete Temperaturmaximum gegen Ende des Sommers fällt mit Perioden erhöhter Windgeschwindigkeiten zusammen. Aufgrund des atmosphärischen Antriebs kommt es im Bereich des Süßwasserausstroms der Lena zu einer Durchmischung der normalerweise stabil geschichteten Wassersäule (Abb. 46). Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Bodenwassertemperatur.

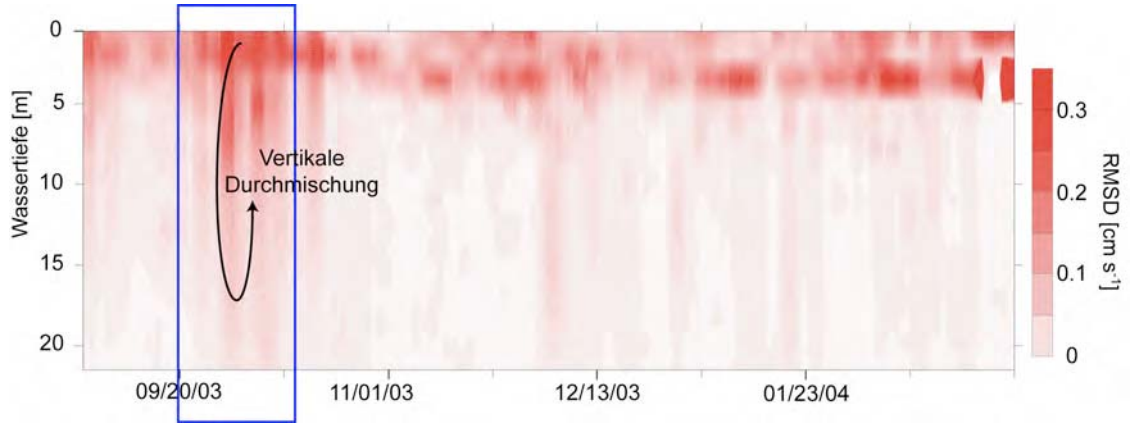

Abb. 46: RMSD (Root Mean Square Deviation) der vertikalen Geschwindigkeiten [cm s^{-1}] am Meeresbodenobservatorium LENA 03, das als Grad zur Bestimmung der maximalen Tiefe der Durchmischung der Wassersäule dient (Auswertung in Zusammenarbeit mit S. Kirillov, OSL). Der blau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum, während dessen die erhöhten Wassertemperaturen im September/Oktober 2003 aufgezeichnet wurden.

Je nachdem wie stark und wieweit nördlich das intermediäre Temperaturmaximum auftritt, kann die Erhöhung der Bodenwassertemperatur durch den Transport von erwärmtem Wasser auf dem inneren Schelf bis zu mehreren Wochen andauern, was zu einer Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur führt. Erhöhungen in den mittleren Jahrestemperaturen können zu einer Destabilisierung des submarinen Permafrostes in Gebieten, wo dieser am Meeresboden ansteht, führen (siehe AG 4). Die in Zusammenarbeit mit der AG 4 geplante ganzjährige Temperaturmessung im Sediment, die zu einem besseren Verständnis dieser Prozesse beitragen sollte, war wegen des Verlustes der Geräte leider nicht erfolgreich. Die Auswertung der Bodenströmung in Zusammenarbeit mit N. Koldunov (OSL) hat ergeben, dass im Zeitraum der

erhöhten Bodenwassertemperaturen ein Transport von Norden nach Süden stattfand. Die Schwebstoffgehalte in Bodennähe wurden von Wegner et al. (in press) aus den akustischen Rückstreuungsdaten der ADCP umgerechnet. Es konnte gezeigt werden, dass gleichzeitig mit dem Temperaturmaximum ein Maximum in den Bodenströmungen und in den bodennahen Schwebstoffgehalten auftrat (Abb. 47). Dies weist darauf hin, dass es zu einer verstärkten Erosion des Meeresbodens und einem verstärkten Eintrag durch Erosion der Permafrostküsten gekommen ist.

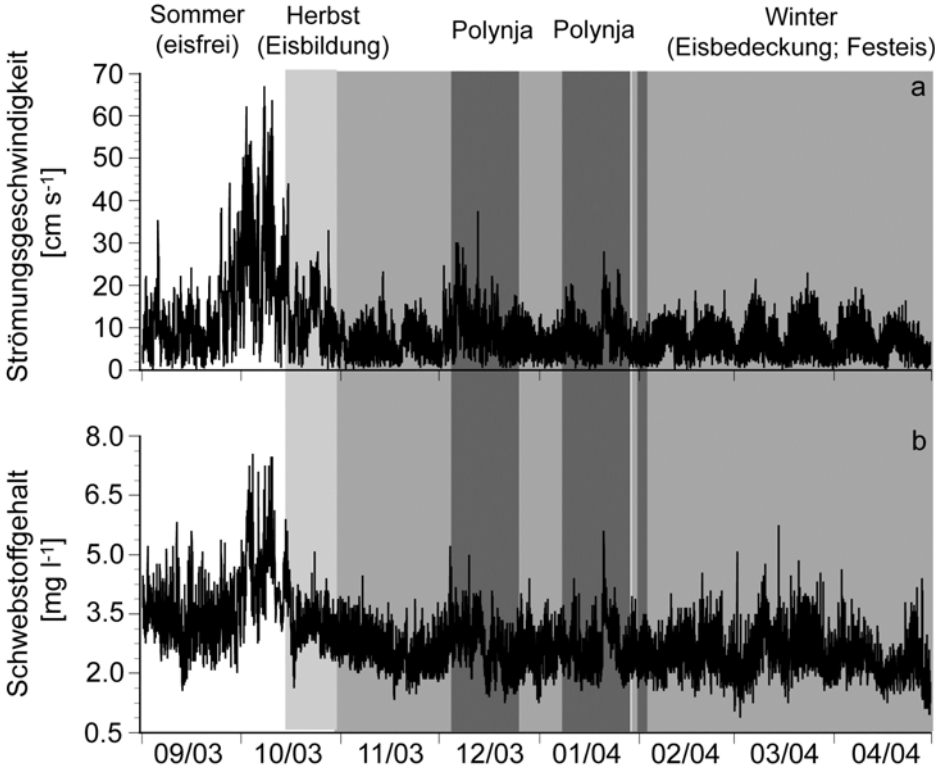

Abb. 47: Strömungsgeschwindigkeiten [cm s^{-1}] (a) und Schwebstoffgehalte [mg l^{-1}] (b) 3,50 m über dem Meeresboden an LENA 03 von September 2003 bis Mai 2004.

Aufgrund der Bedeutung des Salzgehaltes und der Temperatur im Bodenwasser sowie der hydrodynamischen Bedingungen für die Stabilität des submarinen Permafrostes wurde die Variation der Eigenschaften des Bodenwassers weitergehend untersucht. Der Vergleich der ozeanographischen Daten aus der südöstlichen Laptev-See mit Temperatur- und Salzgehaltsmessungen aus Bohrkernen vom inneren Schelf konnte nicht vorgenommen werden, da die Eisbedingungen in der Laptev-See im Sommer 2004 und 2005 die Durchführung von Bohrungen nicht zuließen. Auf der Grundlage unserer Projektdaten und bisheriger Veröffentlichungen (Spaikher et al., 1972; Guay et al., 2001; Dmitrenko et al., 2005) können wir davon ausgehen, dass die zwischenjährlichen Variationen der Sommerhydrographie von den atmosphärischen Bedingungen geprägt werden. Für die Interpretation der zwischenjährlichen Verände-

rungen der Temperatur- und Salzgehaltsdaten in der südlichen Laptev-See wurde eine Klassifizierung der Laptev-See-Projektdaten und der atmosphärischen Bedingungen vorgenommen. Dabei wurden systematische Temperatur- und Salzgehaltsveränderungen im Bodenwasser der südlichen Laptev-See identifiziert, welche mit den vorgenommenen atmosphärischen Klassifizierungen korreliert sind.

Für einen Vergleich der Sommerhydrographie können anhand der atmosphärischen Zirkulation und der Ausprägung der Oberflächensalzgehaltsverteilung zwei Fälle unterschieden werden:

- Jahre mit einem verstärkten nördlichen Oberflächentransport, sogenannte „offshore"- Jahre (1999), und
- Jahre mit einem verminderten Austausch und einem ostwärts gerichteten Oberflächentransport entlang der Küste, sogenannte „onshore"-Jahre (1993, 1994, 2000; mit Einschränkungen 1998, da zeitlich wesentlich früher beprobt, und 2003, da räumlich nur sehr beschränkt beprobt werden konnte).

Die Bodenwässer in der südlichen Laptev-See waren 1999 unter verstärktem nördlichen Oberflächentransport einem ebenfalls verstärkten Austausch durch einen sogenannten Gegenstrom („counter current") am Boden ausgesetzt. Dies zeigt sich in wärmeren Bodentemperaturen (Abb. 48, siehe 1999er Daten) und wesentlich niedrigerem Salzgehalt. Dies bedeutet, dass hier ein Austausch mit leicht wärmerem und vor allem wesentlich süßerem Bodenwasser aus anderen Bereichen der Laptev-See stattfindet. Der potentielle Einfluss auf den submarinen Permafrost basiert auf einer Kombination von Temperatur- und Salzgehaltsänderungen. Während eines Arbeitsbesuches von A. Novikhin (OSL) wurde ein Abgleich dieser Ergebnisse mit den Nährstoffdaten der AARI-Datenbank vorgenommen.

Da die vergleichenden Untersuchungen nur im Süden der Laptev-See möglich waren, kann aufgrund dieser Ergebnisse allerdings nicht auf das prinzipielle Fehlen von Wasser atlantischen Ursprungs in der Laptev-See geschlossen werden, dessen Auftreten zu einer Salzgehaltserhöhung führen würde. Die potentiell damit verbundene Temperaturerhöhung hätte einen destabilisierenden Einfluss auf den submarinen Permafrost. Daher ist es wichtig, den Austausch zwischen Laptev-See-Schelf und Arktischer Halokline und dem eventuellen sporadischen Aufströmen von Wasser atlantischen Ursprungs zu untersuchen.

Für eine Evaluierung des Austausches mit dem Arktischen Ozean wurden Sauerstoffisotopen-Daten des Laptev-See-Verbundvorhabens (aus dem Jahr 1994) vom südlichen und mittleren Laptev-See-Schelf mit Literaturdaten (1993, 1995) von der Schelfkante kombiniert.

Diese Daten zeigen einen Export von Wassermassen, welche im Winter während der Meereisbildung geformt wurden. Dieser Export beinhaltet eventuell auch ein Nachströmen, d. h. einen Import von Wasser aus dem Arktischen Ozean. Außerdem kann aus der Interpretation der kombinierten Sauerstoffisotopendaten und Salzgehaltsdaten abgeleitet werden, dass in der Laptev-See im Winter unter dem Einfluss von Meereisbildung eine Wassermasse mit klar definiertem Salzgehalt und Sauerstoff-Isotopensignatur gebildet wird („Winter Brine Water"; Salzgehalt von ca. 30 und $\delta^{18}O$ von ca. -4‰; Bauch et al., 2005).

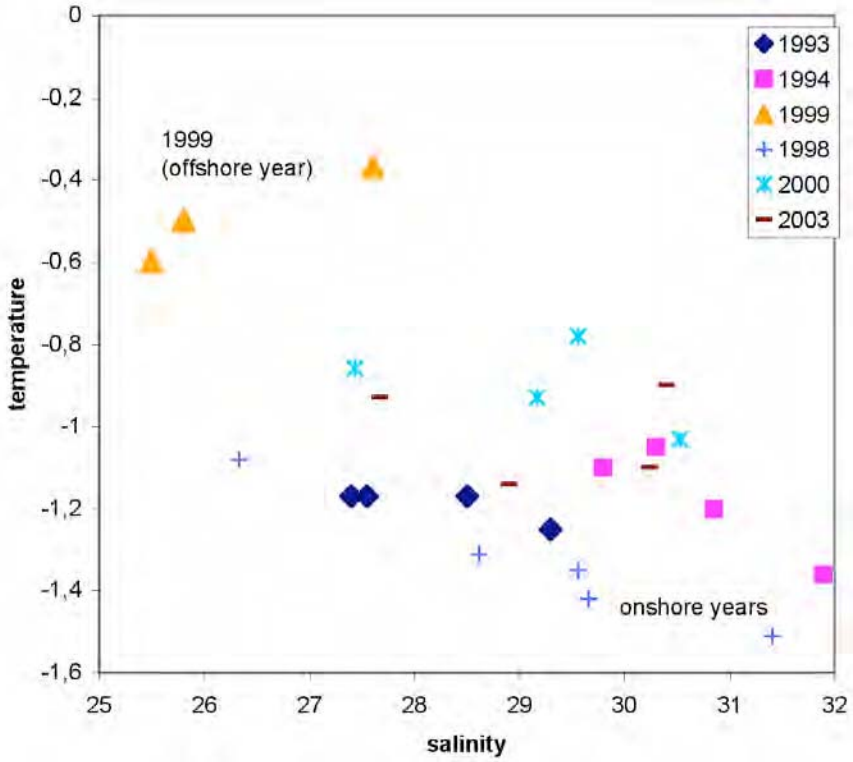

Abb. 48: Temperatur in Abhängigkeit vom Salzgehalt in kalten Bodenwässern des inneren Laptev-See-Schelfs im Sommer. Die Werte für kalte Bodenwässer wurden für Stationen tiefer als 20 m Wassertiefe etwa 130°E geographische Länge und zwischen 72 und 74,5°N geographischer Breite (Lage des submarinen Lena-Paläotals) genommen.

Das Bodenwasser im Süden und in den niedrig-salinen Wasserschichten kann durch eine Mischung dieses Winter-Brine-Wassers mit Flusswasser erklärt werden (Abb. 49, der niedrig-saline Teil der Mischungslinie ist allerdings nicht vollständig gezeigt). Die Bodenwässer im Norden und im höher-salinen Bereich können dagegen durch eine Mischung des Winter-Brine-Wassers mit marinem Wasser atlantischen Ursprungs erklärt werden (Abb. 49; untere Linie im höher-salinen Bereich). Die Existenz und Bildung einer Wassermasse mit klar definiertem Salzgehalt und Sauerstoff-Isotopensignatur ist höchst erstaunlich, da der Laptev-See-Schelf sehr breit und flach ist. Der Ursprung dieses Winter-Brine-Wassers liegt möglicherweise nicht in der quasi-permanenten Eisbildung in der Polynja über die ganze Wintersaison,

sondern im relativ zügigen Zufrieren der südlichen Laptev-See und in der Bildung der landfesten Meereisdecke zu Beginn des Winters im Oktober und November, wenn in erster Näherung ein einheitlicher Oberflächensalzgehalt in der südlichen Laptev-See vorhanden ist.

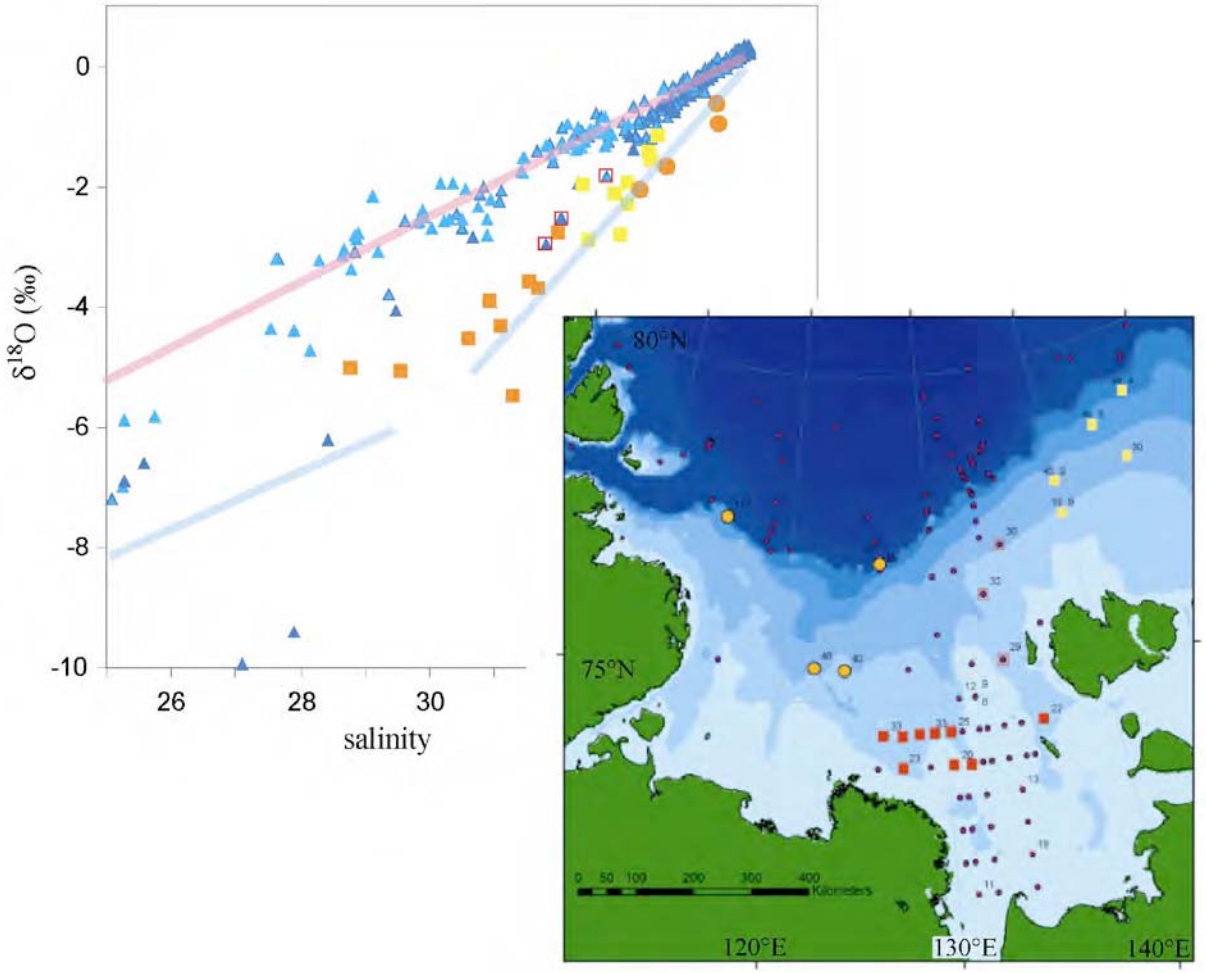

Abb. 49: Zusammensetzung der $\delta^{18}O$-Werte in Abhängigkeit vom Salzgehalt. Die Expeditionsdaten stammen aus den Sommern 1989 (Letolle et al., 1993), 1993 (Frank, 1996), 1994 (Müller-Lupp et al., 2003) and 1995 (Frank, 1996). Die obere Mischungslinie zeigt eine direkte Mischung zwischen Flusswasser und Wasser atlantischen Ursprungs. Die unteren Mischungslinien beschreiben die Mischung von Wässern, welche in unterschiedlichem Maße einen Beitrag aus der Meereisbildung haben. Die geographische Lage dieser Wässer ist regional unterschiedlich und in der dargestellten Stationskarte gekennzeichnet. Die Ziffern geben die Wassertiefe der gekennzeichneten Proben in Metern.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Datensätze der Bodenobservatorien wurden in der Datenbank PANGAEA archiviert und stehen somit für eine weitere Nutzung zur Verfügung. Weitere wissenschaftlichen Ergebnisse sollen in Fachzeitschriften (ISI-gelistet) veröffentlicht werden.

Die Ergebnisse werden weiterhin im Rahmen von internationalen Projekten, Programmen und Netzwerken eingebunden und nutzbar gemacht: ICARP-II-Arbeitsgruppe 6, IPY-Leitpro-

jekt ACCO-Net, NABOS-Projekt, IAPP.

Die Ergebnisse gehen darüber hinaus in geplante nationale DFG-Projekte ein: „Transport dynamics along Siberian continental margins“ (C. Wegner, IFM-GEOMAR) und „The impact of freshwater and brines from Arctic shelf regions on the transformation of water masses along the Arctic Ocean continental margin“ (R. Spielhagen und D. Bauch, Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz).

Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind auf dem Gebiet keine neuen, die Durchführung des Vorhabens beeinflussenden Ergebnisse bekannt geworden.

Literatur

Bauch, D., Erlenkeuser, H. and Andersen, N. (2005) Water mass processes on Arctic shelves as revealed from $\delta^{18}O$ of H_2O. Global and Planetary Change, 48: pp. 165-174. DOI:10.1016/j.gloplacha.2004.12.011.

Dmitrenko, I., Golovin, P., Gribanov, V. A., Kassens, H. and Hölemann, J. (1998) Influence of summer river runoff on ice formation in the Kara and Laptev seas. In: Shen, H.T. (ed.). Ice in surface waters. Rotterdam: Balkema, pp. 251-257.

Dmitrenko, I., Golovin, P., Gribanov, V. A. and Kassens, H. (1999) Oceanographic causes for transarctic ice transport of river discharge. In: Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J. and Timokhov, L. (eds.). Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. Berlin: Springer, pp. 73-92.

Dmitrenko, I., Hölemann, J.A., Kirillov, S.A., Wegner, C., Gribanov, V.A., Berezovskaya, S.L. and Kassens, H. (2001) Thermal regime of the Laptev Sea bottom layer and affecting processes. Earth Crysophere, 3: pp. 40-55 (in Russian).

Dmitrenko, I.A., Kirillov, S.A., Eicken, H. and Markova, N. (2005) Wind-driven summer surface hydrography of the eastern Siberian shelf. Geophysical Research Letters, 32: L14613. DOI:10.1029/2005GL023022.

Frank, M. (1996) Spurenstoffuntersuchungen zur Zirkulation im Eurasischen Becken des Nordpolarmeeres. Dissertation. Heidelberg University, 100 pp.

Gosink, J.P. and Baker, G.C. (1990) Salt fingering in subsea permafrost: some stability and energy considerations. Journal of Geophysical Research, 95 (C6): pp. 9575-9583.

Guay, C.K., Falkner, K.K., Muench, R.D., Mensch, M., Frank, M. and Bayer, R. (2001) Wind-driven transport pathways for Eurasian Arctic river discharge. Journal of Geophysical Research, 106 (C6): pp. 11,469-11,480.

Hutter, K. and Straughan, B. (1999) Models of convection in thawing porous media in support for the subsea permafrost equations. Jounal of Geophysical Research, 104 (B12): pp. 29249-29260.

Kirillov, S., Darovskikh, A. and Dmitrenko, I. (2002) Delay in ice formation onset in the Laptev Sea: consequence of additional heat flux from the bottom layer. Terra Nostra, 2002/3: pp. 56-57.

Létolle, R., Martin, J., Thomas, A., Gordeev, V., Gusarova, S. and Sidorov, I. (1993) ^{18}O abundance and dissolved silicate in the Lena delta and Laptev Sea (Russia). Marine Chemistry, 43: pp. 47-64.

Mueller-Lupp, T., Erlenkeuser, H. and Bauch, H.A. (2003) Seasonal and interannual variability of Siberian river discharge in the Laptev Sea inferred from stable isotopes in modern bivalves. Boreas, 32 (2): pp. 292-303.

Shpaikher, O., Federova, Z.P. and Yankina, Z.S. (1972) Interanual variability of hydrological regime of the Siberian shelf seas in response to atmospheric processes (in Russian). Proc. AARI, 306: pp. 5-17.

Taylor, A.E. and Allen, V. (1987) Shallow temperature perturbations and sediment thermal conductivities, Canadian Beaufort shelf. Canadian Journal of Earth Sciences, 24: pp. 2223-2234.

Vigdorchik, M.E. (1980) Arctic Pleistocene history and the development of submarine permafrost. Boulder, Colorado: Westview Press, 286 pp.

Wegner, C., Hölemann, J. and Churun, V. (2004) The Russian-German TRANSDRIFT IX Expedition of RV "Ivan Kireyev" 2003. In: Schirrmeister, L. (ed.). Expeditions in Siberia in 2003. Reports on Polar and Marine Research, 489, pp. 210-231.

Wegner, C. Hölemann, J.A., Klagge, T., Timokhov, L. and Kassens, H. (in press) Application of ADCPs for long-term sediment transport monitoring in Arctic environments – examples from the Laptev Sea. In: Proceeding of OMAE2006, 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.

AG 8: Koordination

Zur Darstellung der Ergebnisse der AG 8 vgl. Kapitel I, insbesondere „Planung und Ablauf des Verbundvorhabens“.