



20

Jahre terrestrische Forschung  
in der sibirischen Arktis  
Die Geschichte  
der Lena-Expeditionen





105 E

115

100

110

120

130

140 E  
80 N

79 N

78

77

76

75

74

73

72

71 N

Taimyr-Halbinsel

Chatanga

Anabar

Olenjok

Lenadelta

Lena

Chatanga

Laptev-see

Tiksi

Jana

Jakutsk

S i b i r i e n

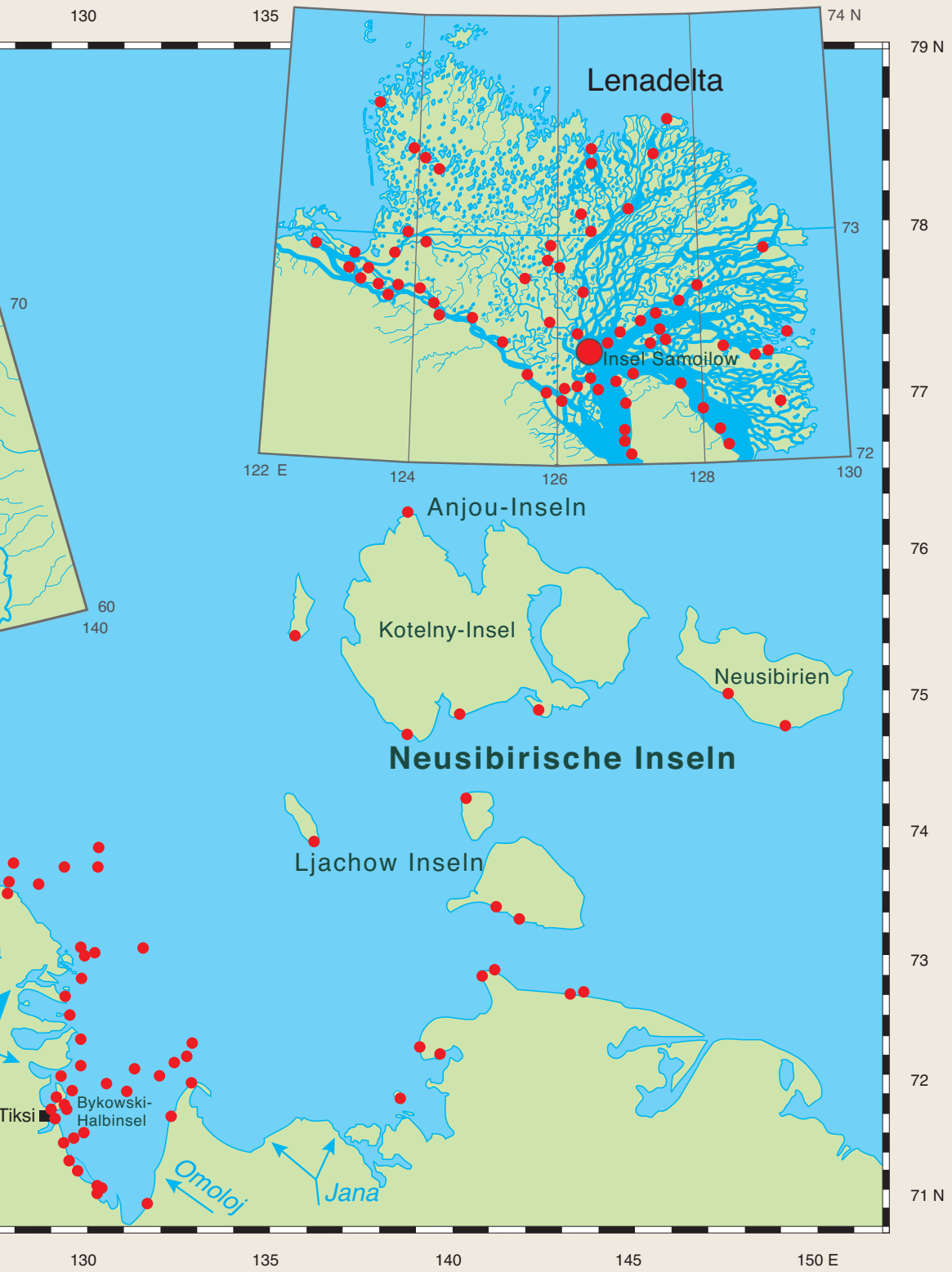
105 E

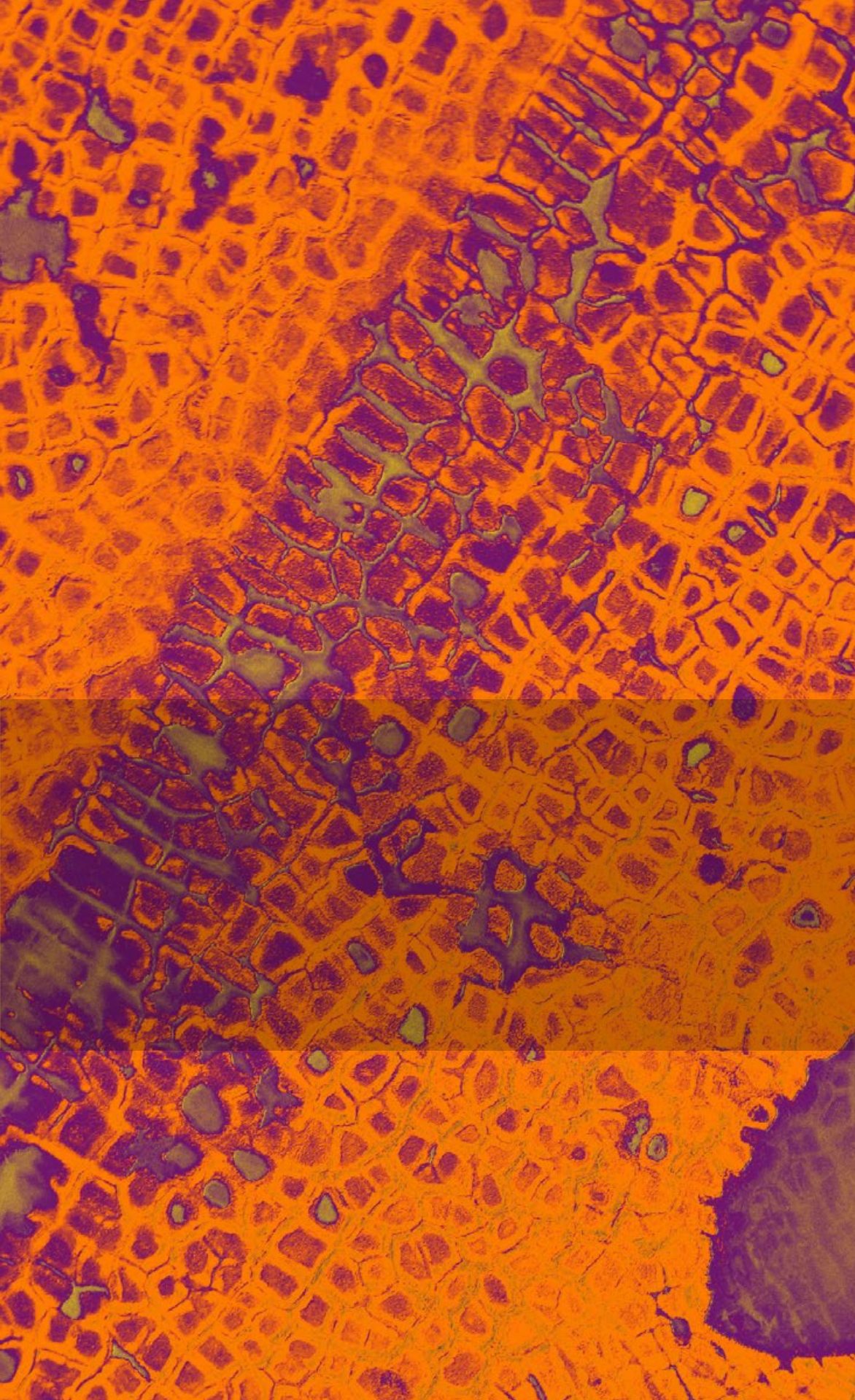
110


115

120

125





The background of the cover is a microscopic image of plant tissue, likely a cross-section of a stem or root. The cells are stained, showing a mix of orange and purple hues. The structure is highly organized, with distinct layers and cellular boundaries. The overall appearance is that of a detailed biological specimen.

## 20 Jahre terrestrische Forschung in der sibirischen Arktis

Hans-Wolfgang Hubberten, Dmitry Yu. Bolshiyarov,  
Mikhail N. Grigoriev, Guido Grosse, Anne  
Morgenstern, Eva-Maria Pfeiffer, Volker Rachold,  
Lutz Schirrmeister

## Inhalt

Einführung und Hintergrund der terrestrischen Expeditionen in Sibirien <i>Hans-Wolfgang Hubberten, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev, Volker Rachold, Eva-Maria Pfeiffer</i>	8
<b>1. Auf dem Weg zu den Lena-Expeditionen 1993-1997</b>	
Seesedimente auf Taimyr und Sewernaja Semlja als Klima-Archiv <i>Pier Paul Overduin, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Martin Melles</i>	18
Erste Studien zu Energie-, Wasser- und Spurengasflüssen in Tundraböden: Labas-See und Lewinson-Lessing-See, Taimyr-Halbinsel <i>Eva-Maria Pfeiffer, Julia Boike, Mikhail P. Zhurbenko, Dmitry Yu. Bolshiyarov</i>	24
Untersuchungen von Permafrost-Sequenzen in der Taimyr-Tiefebene (1994-1996) <i>Christine Siegert, Alexander Yu. Dereviagin</i>	26
Kohlenstoff in den arktischen Wüstenböden von Sewernaja Semlja <i>Eva-Maria Pfeiffer, Mikhail P. Zhurbenko, Dmitry Yu. Bolshiyarov</i>	30
Hydrologie, Geochemie und Sedimenttransport in den Flüssen Sibiriens - Das SYSTEM LAPTEV SEA Projekt 1994-1997 <i>Volker Rachold</i>	33
<b>2. Der Beginn der Lena-Expeditionen 1998-2002</b>	
Initiierung des Forschungsprojekts Lenadelta: Wissenschaftliche Strategie, Kooperation und Logistik <i>Volker Rachold, Martin Antonow, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Eva-Maria Pfeiffer</i>	38
Die ersten Jahre der boden- und klimabezogenen Permafrostforschung auf Samoillow und Umgebung (Untersuchungen 1998-2001) <i>Eva-Maria Pfeiffer, Julia Boike, Günter Stoof, Lars Kutzbach, Mikhail N. Grigoriev, Irina A. Yakshina, Anna N. Kurchatova, Dmitry Yu. Bolshiyarov</i>	42
Bykowski-Halbinsel: Die erste Landexpedition mit Fokus auf das Paläoklima <i>Lutz Schirrmeyer, Guido Grosse, Viktor V. Kunitsky, Christine Siegert, Hanno Meyer</i>	48
Schiffsexpeditionen von 1998 bis 2002 zur Untersuchung von Erosion und Geomorphologie der Küste mit Dunai, Neptun, Sofron Danilov und Pavel Bashmakov <i>Volker Rachold, Waldemar Schneider, Mikhail N. Grigoriev, Hans-Wolfgang Hubberten, Felix E. Are, Dmitry Yu. Bolshiyarov</i>	52

Untersuchung von Seen auf Arga: Geschichte und Entstehung des Lenadeltas	55
<i>Georg Schwamborn, Mikhail N. Grigoriev, Volker Rachold, Vladimir E. Tumskey, Lutz Schirrmeister, Guido Grosse</i>	
Mikrobieller Kohlenstoffumsatz in der Auftauschicht und im Permafrost	58
<i>Susanne Liebner, Christian Knoblauch, Eva-Maria Pfeiffer, Svetlana Yu. Evgrafova, Dirk Wagner</i>	
Feldarbeit für die Rekonstruktion der Paläoumwelt	61
<i>Lutz Schirrmeister, Tatyana V. Kuznetsova, Andrei A. Andreev, Frank Kienast, Dmitry Yu. Bolshiyarov</i>	
<b>3. Prozessstudien zur Permafrostdynamik 2002-2006</b>	
Submarine Permafrostbohrungen während der COAST 2005 Expedition	68
<i>Volker Rachold, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Waldemar Schneider</i>	
Die frühe Forschungsstation Insel Samoilow und ihre Erweiterung 2005	71
<i>Hans-Wolfgang Hubberten, Julia Boike, Eva-Maria Pfeiffer, Günter Stoof, Alexander Yu. Gukov</i>	
Installation des Samoilow Observatoriums - wissenschaftliches Monitoring von Klimadaten, Permafrostböden und Treibhausgasen (Untersuchungen 2002-2006)	76
<i>Lars Kutzbach, Christian Wille, Torsten Sachs, David Holl, Günter Stoof, Julia Boike, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer</i>	
Mikrobieller Stickstoffumsatz in der Auftauschicht und den tieferen Permafrostsedimenten des Lenadeltas	82
<i>Claudia Fiencke, Tina Sanders, Fabian Beermann, Elena E. Lebedeva, Eva-Maria Pfeiffer</i>	
Geokryologische und paläoökologische Studien an den Küsten der Laptewsee	86
<i>Lutz Schirrmeister, Christine Siegert, Guido Grosse, Hanno Meyer, Mikhail N. Grigoriev, Viktor V. Kunitsky</i>	
Langzeitbeobachtungen der pelagischen Fauna in Seen und Tümpeln des Lenadeltas	90
<i>Ekaterina N. Abramova, Irina I. Vishnyakova, Grigory A. Soloviev, Anna A. Abramova</i>	
<b>4. Umsetzung neuer Forschungsthemen 2007-2012</b>	
Die Dynamik der arktischen Küsten	96
<i>Frank Günther, Mikhail N. Grigoriev, P. Paul Overduin, Hugues Lantuit, Hans-Wolfgang Hubberten</i>	
Feldarbeit und Erstellung numerischer Modelle von submarinem Permafrost und Gashydraten	100
<i>Hans-Wolfgang Hubberten, Pier Paul Overduin, Sebastian Wetterich, Mikhail N. Grigoriev</i>	

Permafrostdegradation, Thermokarst und Thermoerosion - Feldforschung auf der Insel Kurungnach	104
<i>Anne Morgenstern, Irina V. Fedorova, Antonina A. Chetverova, Frank Günther, Mathias Ulrich, Fabian Beermann, Sebastian Zubrzycki, Sofia A. Antonova, Samuel Stettner, Julia Boike</i>	
Mit Kettensäge zum Klimamodell - Eiskeile als Winterklima-Archive	111
<i>Hanno Meyer, Thomas Opel, Alexander Yu. Dereviagin</i>	
Veränderungen nordsibirischer Seen und Baumgrenzen in der Vergangenheit und Gegenwart als Reaktion auf Erwärmung	114
<i>Ulrike Herzs Schuh, Luidmila A. Pestryakova, Laura S. Epp, Larisa A. Frolova, Ruslan M. Gorodnichev, Birgit Heim, Florian Jeltsch, Juliane Klemm, Stefan Kruse, Larisa B. Nazarova, Bastian Niemeyer, Anatolii N. Nikolaev, Kathleen R. Stoof-Leichsenring, Ralph Tiedemann, Mareike Wieczorek, Evgenij S. Zakharov, Heike H. Zimmermann</i>	
Kohlenstoff in Permafrost - Quantifizierung der Menge an organischem Material in Sibirien	117
<i>Jens Strauss, Lutz Schirrmeister, Sebastian Zubrzycki, Alexander L. Kholodov, Mikhail N. Grigoriev, Viktor V. Kunitsky, Matthias Fuchs, Eva-Maria Pfeiffer, Guido Grosse</i>	
Expeditionen mit Gummibooten und kleinen Flussbooten - Hydrologie und Geomorphologie des Lenadeltas	120
<i>Dmitry Yu. Bolshiyarov, Irina V. Fedorova, Julia Boike</i>	
Mobilisierung und Ablagerung von Kohlenstoff im Lena-Flusssystem	124
<i>Gesine Mollenhauer, Maria Winterfeld, Boris P. Koch, Irina V. Fedorova</i>	
Holozäne Seen rund um das Lenadelta	128
<i>Bernhard Diekmann, Boris Biskaborn, Luidmila A. Pestryakova, Dmitry A. Subetto, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Ulrike Herzs Schuh, Georg Schwamborn, Volker Rachold</i>	
Logistisch komplexe Einsätze - Beobachtungen von Energie- und Treibhausgasflüssen aus der Luft mittels Helipod	132
<i>Torsten Sachs, Eric Larmanou, Katrin Kohnert, Andrei Serafimovich</i>	
Lena Expeditionen: Einbindung neuer deutscher Forschungsgruppen	137
<i>Birgit Heim, Hans-Wolfgang Hubberten, Pier Paul Overduin, Irina V. Fedorova</i>	
Ein Jahrzehnt der Küstenforschung im Lenadelta	142
<i>Ingeborg Bussmann, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Irina V. Fedorova, Mikhail N. Grigoriev, Alexander Yu. Gukov, Gerhard Kattner, Alexandra Kraberg, Denis V. Moiseev, Pier Paul Overduin, Lasse Sander, Karen H. Wiltshire</i>	
<b>5. Neue Horizonte für Lena-Expeditionen - Die neue Forschungsstation Insel Samoilow</b>	
Ministerpräsident W. W. Putin besucht die Insel Samoilow (P-Day)	150
<i>Hanno Meyer, Thomas Opel, Alexander Yu. Dereviagin, Svetlana Yu. Evgrafova, Waldemar Schneider, Alexander S. Makarov, Mikhail N. Grigoriev</i>	



Die neue Forschungsstation Insel Samoillow: Bau, Eröffnungsfeier, Anlage und Betrieb	153
<i>Mikhail N. Grigoriev, Hans-Wolfgang Hubberten, Igor N. Yeltsov, Anne Morgenstern</i>	
Samoillow in internationalen Programmen und Netzwerken – FLUXNET, GTN-P, INTERACT	159
<i>Anne Morgenstern, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Julia Boike, Lars Kutzbach</i>	
Kurzer Überblick über die russisch-deutschen Permafrost-Projekte CARBOPERM und KoPf	163
<i>Eva-Maria Pfeiffer, Hans-Wolfgang Hubberten, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Sebastian Zubrzycki, Ulrike Herzsuh, Guido Grosse</i>	
Einsatz von Fernerkundung im Gebiet der Laptewsee	166
<i>Guido Grosse, Birgit Heim, Sofia Antonova, Julia Boike, Astrid Bracher, Alexey N. Fague, Frank Günther, Thomas Krumpfen, Moritz Langer, Anne Morgenstern, Sina Muster, Ingmar Nitze, Torsten Sachs</i>	
Multidisziplinäre Studien auf Samoillow und Kurungnach: Geophysik, Fernerkundung, Geologie sowie botanische und Bodenstudien	171
<i>Igor N. Yeltsov, Alexey N. Faguet, Leonid V. Tsibizov, Vladimir A. Kashirtsev, Vladimir V. Olenchenko, Andrey A. Kartoza, Nikolay N. Lashchinskiy</i>	
Terrestrische Permafrost-Bohrkampagnen: Tiefe Einblicke in die Vergangenheit	174
<i>Jens Strauss, Mikhail N. Grigoriev, Paul Overduin, Georgii Maximov, Guido Grosse, Alexey N. Fague, Leonid Tsibizov, Lutz Schirrmeister</i>	
Langzeitmessungen der Energie-, Wasser-, und Treibhausgasflüsse zwischen Land und Atmosphäre von 2002 bis heute und darüber hinaus	177
<i>David Holl, Julia Boike, Torsten Sachs, Peter Schreiber, Niko Bornemann, Christian Wille, Eva-Maria Pfeiffer, Irina V. Fedorova, Lars Kutzbach</i>	
Kohlenstoffumsatz von auftauendem Permafrost im Lenadelta	180
<i>Christian Knoblauch, Janet Rethemeyer, Alexander Schütt, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer</i>	
<b>6. Kooperationen im Rahmen zukünftiger Lena-Expeditionen</b> <small>Ein Ausblick</small>	
Künftige Zusammenarbeit der terrestrischen Polarforschung in der Lenadeltaregion – Ein Ausblick	186
<i>Guido Grosse, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer, Igor N. Yeltsov, Hans-Wolfgang Hubberten</i>	
<b>Anhang</b>	
Autoren und Zugehörigkeiten	192
Literaturnachweise der einzelnen Kapitel	194
Impressum	202



(Foto: P. Verzone)



## Einführung und Hintergrund der terrestrischen Expeditionen in Sibirien

Der Erfolg der russisch-deutschen Zusammenarbeit in den letzten zwei Jahrzehnten basiert auf der Freundschaft der Beteiligten, denen allen die Einzigartigkeit der russischen Arktis bewusst ist. Unser Rückblick eröffnet auch neue Perspektiven für die russisch-deutsche Permafrostforschung.

Alles begann mit der Perestroika in Russland und der Wiedervereinigung in Deutschland. Beide waren historische Schritte, die den Anfang einer langjährigen russisch-deutschen Zusammenarbeit in der Polarforschung in Sibirien darstellen. Die Gründung der neuen Potsdamer Forschungsstelle des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung (kurz AWI Potsdam) im Jahr 1992 war ein weiterer wichtiger Schritt für die gemeinsame Forschung in den Polarregionen. Das AWI Potsdam, welches die ehemals ostdeutsche Erforschung der Antarktis einbezog, konzentrierte seine Forschung auf paläoklimatische Studien. Hierzu wurden Seesedimente in der Antarktis und Arktis als Archive eingesetzt. Während der Forschungsarbeiten zur Entstehung und Veränderung der Permafrostlandschaften - mit Schwerpunkt in Sibirien - konnte man auf die langjährigen Partnerschaften und die fachliche Erfahrung der ehemaligen ostdeutschen und sowjetischen Wissenschaftler aufbauen.



Abbildung 1: Expedition zur Georg-Forster-Station, Schirmacher-Oase, Antarktis, 1991/92.

Eine erste Expedition zur Schirmacher-Oase und ostdeutschen Georg-Forster-Station in der Antarktis führte ehemals ostdeutsche und einen westdeutschen Wissenschaftler bereits im Sommer 1991/1992 zusammen, die ein Team für paläoklimatische Studien bildeten (Abbildung 1). Basierend auf der langjährigen Zusammenarbeit sowjetischer und ostdeutscher Wissenschaftler bei gemeinsamer Logistik und Forschung in der Antarktis wurden in den folgenden Jahren viele Expeditionen zu antarktischen Oasen unternommen. Diese wurden von Sergey Verkulich vom Arktischen und Antarktischen Forschungsinstitut (AARI) in St. Petersburg und Martin Melles vom AWI Potsdam geleitet.

Im Jahr 1992 nahmen einige Mitglieder des AWI Potsdam an der Internationalen Konferenz für Frostbodenkunde in Puschtschino, Russland, teil. Aufbauend auf der Erfahrung der Permafrost-Wissenschaftlerin Christine Siegert, die mehr als 20 Jahre am Melnikov Permafrost Institut (MPI) in Jakutsk gearbeitet hatte, bevor sie zum AWI Potsdam wechselte, begann man gemeinsame Forschungsprojekte und Expeditionen nach Sibirien zu planen (Abbildung 2).



Als Folge davon fand zusammen mit Wissenschaftlern der Staatlichen Universität Moskau eine Expedition zum Lamasee nahe der Stadt Norilsk in Sibirien statt. Dabei konnten die Forscher erfolgreich mehrere Meter lange Seesedimentkerne zum Zwecke der paläoklimatischen Rekonstruktion entnehmen.

Als Teil der Zusammenarbeit des AWI und AARI, hauptsächlich bei logistischen Einsätzen in der Antarktis, wurde eine erfolgreiche Kooperation mit Dmitry Yu.

Abbildung 2: Frostbodenkunde-Konferenz 1992 in Puschtschino mit Nikolai Romanovskii, Eva-Maria Pfeiffer, Hans-W. Hubberten, Christine Siegert, und anderen Teilnehmern der ersten Stunde in der russisch-deutschen Zusammenarbeit.

Bolshyanov, einem führenden Wissenschaftler des Fachbereichs Geographie am AARI, ins Leben gerufen.

Im Jahr 1993 wurde eine erste gemeinsame Erkundungsexpedition zur Taimyr-Halbinsel durchgeführt. Dieses Vorprojekt war Grundlage für die Finanzierung des Forschungsprojekts „Taymyr“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) von 1994 bis 1997. Mitglieder des AARI, der Staatlichen Universität Moskau und aus Puschtschino unternahmen zusammen mit deutschen Forschergruppen des AWI, der Universität Hamburg (UHH), und des Instituts für Polarökologie in Kiel mehrere erfolgreiche Expeditionen zur Taimyr-Halbinsel und der Inselgruppe Sewernaja Semlja.

Das GEOMAR in Kiel initiierte unter der Leitung von Jörn Thiede weitreichende Initiativen in der arktischen Meeresforschung. 1993 organisierten Heidemarie Kassens (GEOMAR), Sergei Priamikov (AARI), und Rüdiger Stein und Hans-Wolfgang Hubberten (AWI) mithilfe von Forschungsgeldern des BMBF einen ersten russisch-deutschen Workshop in St. Petersburg. Für diesen Workshop kamen Wissenschaftler vieler deutscher und russischer Forschungseinrichtungen zusammen (Abbildung 3). Dieser Workshop war der Beginn der erfolgreichen deutsch-russischen Zusammenarbeit in der Polar- und Meeresforschung mit Fokus auf der sibirischen Laptewsee und deren Hinterland. Als erstes größeres



Abbildung 3: Organisatoren des ersten Laptewsee-Workshops in St. Petersburg 1993. Von links: Rüdiger Stein, Hans-W. Hubberten, Helga Henschel und Heidemarie Kassens.

Forschungsprojekt wurde das „System Laptev Sea Project“ von Jörn Thiede und Heidemarie Kassens koordiniert. Man erforschte hauptsächlich das transpolare Driftsystem von der Laptewsee zur Framstraße und zum Nordatlantik. Fast jedes Jahr kamen für die berühmten „Transdrift“-Expeditionen russische und deutsche Studenten und Wissenschaftler zusammen. Ein Teilprojekt des „System Laptev Sea Project“, das hauptsächlich vom AWI in Potsdam und einigen russischen Forschungseinrichtungen durchgeführt wurde, konzentrierte sich auf den Stofftransport der Flüsse Lena, Jana, Olenjok und Anabar, die in die Laptewsee fließen. Volker Rachold vom AWI sowie Wissenschaftler der Staatlichen Universität Moskau organisierten drei Sommer lang Expeditionen mit kleineren Binnenschiffen.

Nach Abschluss der Taimyr- und Laptewsee-Projekte wurde vom BMBF ein neues russisch-deutsches Projekt finanziert. Es brachte die auf Meeresforschung spezialisierten Forschergruppen des GEOMAR, AWI, AARI und anderer Forschungseinrichtungen mit den auf Landforschung spezialisierten Gruppen der Universität Hamburg, des AWI Potsdam, des Melnikov Permafrost Institute in Jakutsk (MPI), des AARI und anderen zusammen. Jörn Thiede vom GEOMAR koordinierte dieses „Laptev Sea 2000“ genannte Projekt. Volker Rachold (AWI), Mikhail N. Grigoriev (MPI), Eva-Maria Pfeiffer (UHH) und Dmitry Yu. Bolshiyarov (AARI) initiierten die erste Lena-Expedition als Teil dieses Projekts. Hauptziele waren die Erforschung des Permafrostsystems auf der Insel Samoillow im Lenadelta sowie paläoklimatische Studien am Mamontovy-Khayata-Eiskomplex auf der Bykowski-Halbinsel und Studien zur Küstendynamik mit kleinen Binnenschiffen im Lenadelta.

Seit jenen Tagen im Jahr 1998 wurden jährlich interdisziplinäre Lena-Expeditionen durchgeführt, hauptsächlich unter der Federführung des AARI, AWI, MPI, und der UHH, die dabei helfen sollen, das komplexe System der Permafrostlandschaften in Russland zu verstehen. Diese Expeditionen wären ohne die ausgezeichnete Unterstützung der Hydrobase Tiksi und deren Direktor Dmitry Melnichenko sowie des Arktika GeoCentre, Logistik-Unternehmen vor Ort, nicht möglich gewesen. Ein anderer wichtiger Partner vor Ort war stets das Lenadelta-Reservat (LDR), nicht zuletzt weil ein Großteil der Gebiete, in denen die Arbeiten der Lena-Expeditionen stattfanden, zum Naturschutzreservat des Lenadeltas gehören und weil LDR-Wissenschaftler unter Direktor Alexander Gukov an den Expeditionen teilnahmen. Über die Jahre hinweg war die Forschungsstation Insel Samoillow (FS Samoillow), die seit 1998 gemeinsam vom AWI und der LDR betrieben wird, der zentrale Ausgangspunkt verschiedenster Expeditionen ins Lenadelta.

In den folgenden Jahren wurde immer mehr moderne Technik für die Langzeitmessungen und zur Bilanzierung von Energie-, Wasser- und Spurengasflüssen installiert. Studien zu paläoökologischen Veränderungen wurden an repräsentativen Standorten im Lenadelta und auf den Inseln der Neusibirischen Inseln durchgeführt, wo Proben von Seesedimenten und lange Eiskomplex-Sequenzen entnommen wurden.

Untersuchungen der Küstendynamik entwickelten sich zu einem weiteren Schwerpunktthema. Dafür brachen Expeditionen auf kleinen Booten zu den nördlichen Eismeerküsten des Lenadeltas, zur westwärts gelegenen Taimyrhalbinsel und zu den östlichen Gebieten des rezenten Deltas auf. Größere hochseetaugliche Schiffe wurden eingesetzt, um zu verschiedenen Neusibirischen Inseln und zur Küste der Dmitri-Laptew-Straße zu gelangen. Ein Höhepunkt der Untersuchungen der Küstendynamik war die COAST-Bohrkampagne, die 2005 von Volker Rachold und Mikhail N. Grigoriev koordiniert und durch das BMBF Laptev Sea 2000 Projekt gefördert wurde.

Nachdem der Förderungszeitraum des Laptewsee-Projekts 2006 endete, wurden die Lena-Expeditionen mit Mitteln deutscher und russischer Forschungseinrichtungen weiter unterstützt. Kleinere Projekte wurden von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) oder dem russischen RFBR (Russischer Fonds für Grundlagenforschung) gefördert.



Abbildung 4: Forschung im Gebiet der Laptewsee. Russisch-deutscher Workshop organisiert durch das OSL und das AWI am AARI, 2010.



Die terrestrischen Expeditionen waren eng mit den marinen Schiffsexpeditionen in der Laptewsee verbunden. Über die jährliche, sogenannte Wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit (WTZ) mit Russland wurden die Forschungsarbeiten zwischen den Forschungsministerien in Russland und Deutschland abgestimmt. Dabei wurden zentrale Aufgaben durch das AARI in St. Petersburg übernommen, wo alle Expeditionen koordiniert und Genehmigungen eingeholt wurden. Über regelmäßige Workshops zum Projekt "System Laptev Sea" wurden auch verstärkt junge Nachwuchswissenschaftler in die russisch-deutsche Zusammenarbeit eingebunden (Abbildung 4). Hier ist auch Idee für eine gemeinsame russisch-deutsche Masterausbildung im Bereich der Polar- und Meereswissenschaften (M.Sc. POMOR) entstanden.

Durch die Gründung des russisch-deutschen Otto-Schmidt-Labors für Polar- und Meeresforschung (OSL) am AARI in St. Petersburg im Jahr 2000 sowie der Einrichtung eines Stipendiaten-Programms im Rahmen dieses Projekts, wurde eine der wichtigsten Plattformen für die Zusammenarbeit ins Leben gerufen. Koordiniert von seinen Kodirektoren Heidemarie Kassens und Leonid Timokhov (sowie nachfolgend Irina Fedorova und derzeit Vasilii Povazhnyy), wurde das OSL das Herzstück und der Haupttreffpunkt für die russisch-deutsche Zusammenarbeit in der Polar- und Meeresforschung.

Die Weiterentwicklung des bilateralen Masterprogramms POMOR (koordiniert von Georgy Cherkashov) an der Staatlichen Universität St. Petersburg und der Universität Hamburg (koordiniert von Eva-Maria Pfeiffer) ist ein weiterer wichtiger Meilenstein für die langjährige russisch-deutsche Zusammenarbeit. Über Drittmittel und die Unterstützung des AARI, des AWI, des GEOMAR sowie die Beteiligung verschiedener deutscher Universitäten (Bremen, Kiel, Potsdam, Rostock) konnte der M.Sc. POMOR in diesem Jahr erneut erfolgreich international akkreditiert werden. Die jungen POMORen erhalten einen doppelten Abschluss (Double Degree) der Universitäten St. Petersburg und Hamburg.

Die Lena-Expeditionen konzentrierten sich weiterhin auf Permafrost und Landssysteme und wurden in den Jahren 2013-2015 großzügig durch das BMBF-Projekt „CARBOPERM“ gefördert. Koordiniert von Eva-Maria Pfeiffer, UHH, und Hans-W. Hubberten, AWI Potsdam, konnten neue Forschungsthemen im Bereich Permafrost angestoßen und die terrestrischen Lena-Expeditionen fortgesetzt werden. Die Förderung weiterer europäischer Projekte wie INTERACT und das EU FP7-Projekt PAGE 21, das von 2011 bis 2015 finanziert und von Hans-W. Hubberten, AWI Potsdam, koordiniert wurde, öffnete die terrestrische Forschung für andere internationale Gruppen, z. B. aus Schweden, Dänemark und der Schweiz.

Eine aktuelle Förderung durch das BMBF ermöglicht die Erforschung des Kohlenstoffumsatzes im auftauenden Permafrost des Deltas im Rahmen des sogenannten KoPf-Projekts (2017-2021), das von Eva-Maria Pfeiffer, UHH, geleitet wird und zur Fortführung der Lena-Expeditionen auch nach 20 Jahren beiträgt.

Neue Möglichkeiten eröffneten sich durch den Besuch von Premierminister Wladimir W. Putin auf der Insel Samoilow am 23. August 2010. Als Folge konnte eine heute international sichtbare, moderne Forschungsstation auf der Insel errichtet und die russisch-deutsche Permafrostforschung wesentlich gestärkt werden. Die Station wird nun das ganze Jahr über von Stationspersonal betrieben. Das Trofimuk-Institute für Erdöl- Gas-Geologie und Geophysik, Sibirischer Zweig der Russische Akademie der Wissenschaften, Nowosibirsk, (IPGG SB RAS) betreibt seit 2012 diese neue Forschungsstation Insel Samoilow. In Fyodor Sellyakhov hat die Station einen überaus erfahrenen und verantwortungsbewussten Stationsleiter, der gemeinsam mit seinem Fachpersonal den täglichen Ablauf und die Arbeit der Forscher auf der Station perfekt organisiert.

Verglichen mit der kleinen, alten, saisonal betriebenen Forschungsstation haben die ganzjährige Verfügbarkeit der neuen Station sowie deren technische und technologische Ausrüstung und Unterstützung die Organisation und Planung der Expeditionsarbeiten auf Samoilow und Umgebung und die Erweiterung der wissenschaftlichen Disziplinen stark verbessert.

In den vergangenen Jahren begannen die Wissenschaftler des IPGG SB RAS sowie dessen Partnerinstitute mit Feldforschung auf und in der Umgebung von Samoilow während jährlich stattfindender Expeditionen und leisteten einen gewichtigen Beitrag zu Permafroststudien im Lenadelta dank einer multidisziplinären Herangehensweise inklusive geophysikalischer Methoden, Fernerkundung, Bodenkunde, Geologie und Botanik.

Aufgrund der Beteiligung einer großen Gruppe von Wissenschaftlern aus Nowosibirsk und anderen russischen Forschungseinrichtungen ist die Planung der Zusammenarbeit viel komplexer geworden als in den ersten 15 Jahren der Lena-Expeditionen, aber die neuen Spezialisierungen und Erfahrung dieser Wissenschaftler wird die gemeinsame Forschung beträchtlich stärken.

Es ist einzigartig, dass internationale Projekte in Russland seit 20 Jahren ununterbrochen durchgeführt geführt werden - dafür steht Samoilow und die Lena-Expeditionen! Sie sind ein spektakulärer Einzelfall und ein Erfolgsbeispiel für russisch-deutsche Zusammenarbeit. Wir hoffen, dass die neue Arktische Forschungsstation Insel Samoilow in den nächsten Jahren ein geeigneter und

verlässlicher Standort für erfolgreiche Aktivitäten auf gemeinsamen Expedition sein wird.

Die Expeditionen und wissenschaftlichen Kooperationen der letzten 20 Jahre waren nur möglich dank der intensiven Unterstützung vieler Einrichtungen und Einzelpersonen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das russische Ministerium für Bildung und Wissenschaft (MON) stellten die Hauptfinanzierung zur Verfügung. Zusätzliche Finanzierung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Russischen Fonds für Grundlagenforschung (RFBR) und anderen Fördergesellschaften gestellt. Die Expeditionen hätten ohne die unerlässliche logistische Unterstützung des AARI und des AWI nicht unternommen werden können.

Die Unterstützung durch die Hydrobase und das Lenadeltareservat in Tiksi sowie die Unterstützung durch lokale und regionale Behörden waren für die Umsetzung der Feldforschung unerlässlich. Unser Dank gilt nicht nur diesen Einrichtungen und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den verschiedenen fachlichen Abteilungen, sondern auch den vielen Akteuren vor Ort auf der Station und im Einsatz im Gelände. Die Ranger des Lenadeltareservat, die Köche auf der Station und den vielen Feld-Camps, die Kapitäne und Besatzungen der Boote und Schiffe, die Bohrteams, die Techniker und die vielen Helfer im Feld leisteten hervorragende Arbeit - unter nicht immer einfachen Bedingungen - und haben einen wesentlichen Beitrag an der Erfolgsgeschichte im Lenadelta.

Wir möchten allen Institutionen und Einzelpersonen danken, die 20 Jahre terrestrischer Lena-Expeditionen durch ihre Unterstützung und ihr persönliches Engagement möglich gemacht haben.

Darüber hinaus danken wir allen, die an der Vorbereitung, Gestaltung und Produktion dieser Jubiläumsbroschüre mitgewirkt haben und zwar Claudia Pichler und Yves Nowak von der Abteilung Kommunikation und Medien des AWI, Inge Glinsmann von Glinsmann Design, Sebastian Laboor vom AWI für die Erstellung von Karten und Grafiken, Robert Hanna für die Redaktion der englischen Texte, Elena Tschertkowa-Paulenz und Elena Herbst für die Übersetzung ins Russische, Matthew Fentem für die Übersetzung ins Deutsche und vielen andere Personen, die bei der Fertigstellung dieses Buches sehr geholfen haben.

*Hans-Wolfgang Hubberten, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev,  
Volker Rachold, Eva-Maria Pfeiffer*

„Lotsman“ arbeitet sich durch sedimentreiches Fluss-Eis im Chatangagolf, August 1996.





1.

Auf dem Weg zu den  
Lena-Expeditionen  
1993-1997



## Seesedimente auf Taimyr und Sewernaja Semlja als Klima-Archiv

Im Jahr 1993 organisierten die Staatliche Universität Moskau, das Arktische und Antarktische Forschungsinstitut (AARI) in St. Petersburg und das AWI die erste Expedition zur Taimyr-Halbinsel. Diese gemeinsame Feldforschung in Zentral-sibirien war eine Pilotstudie, die auf gemeinsame deutsch-russische Forschung mit Fokus auf der Umweltgeschichte des Spätquartärs in Zentralnordsibirien vorbereiten sollte.

Dieser anfänglich disziplinäre Fokus weckte das Interesse weiterer Forschergruppen. Innerhalb eines Jahres entwickelte sich das Projekt zu einer mehrjährigen Kampagne mit einem breiten Spektrum an Forschern von mehr als einem Dutzend Forschungseinrichtungen und Universitäten.

Die daraus resultierenden Feldstudien auf der Taimyr-Halbinsel und der Sewernaja Semlja-Inselgruppe fügten dem paläoökologischen Kernthema des ursprünglichen Pilotprojekts Prozessstudien zu Ökologie, Klima und Geographie der Region hinzu. Die Kampagne erstreckte sich entlang eines 1400 km langen Transekts vom südlichen Putorana-Gebirge in der nördlichen Taigazone quer durch die Taimyr-Halbinsel und nördlich bis zum Sewernaja Semlja-Archipel in der hocharktischen Tundrazone.

Abbildung 1: Expeditionsteam, mobile Bohrausrüstung, Vorräte und Proben wurden mittels einer verlässlichen, mit Skiern ausgerüsteten Antonow AN-2 von Chatanga zu den Forschungsstätten geflogen.



Somit umfasste die periglaziale Region also Wälder, Waldgrenzen, Tundra, und polare Wüstenökotone in einem Areal, in dem Fragen zur glazialen Geschichte des Spätquartärs noch nicht geklärt waren. Zusätzlich zu Fragen, die die Verbreitung und den Zeitrahmen der Eisschilde betreffen, konzentrierten sich diese Kampagnen auf die Rekonstruktion der Verlagerung zwischen westsibirischen marinen und ostsibirischen kontinentalen Klimata sowie auf die Effekte dieser Verlagerungen auf Vegetationszonen und Wasser- und Energieflüsse zwischen Boden und Atmosphäre.

Expeditionsteams gelangten von Norilsk und Chatanga aus zu ihren Forschungsstätten, wo sie mit dem Taimyrski Sapowednik (Naturreservat) zusammenarbeiteten und mit einem Mi8 Helikopter und einer Antonow AN2 zu den Forschungsstätten flogen. Es waren die Jahre der Perestroika und die ersten Jahre der deutsch-russischen Zusammenarbeit. Die logistischen Herausforderungen bei jeder Expedition wurden durch Ersteres verstärkt aber das Engagement und die Begeisterung der Expeditionsteilnehmer waren von Anfang an bezeichnend für Letzteres.

Ab 1993 wuchs die Größe der Expeditionsteams und die Saison aktiver Feldarbeit im Sommer mit schwimmenden Bohrplattformen und kleinen Booten wurde um Probennahmen in Seen und weiterer Untersuchungen des See-Eises im April und Mai erweitert. Dokumentationen dieser Expeditionen, welche von 1993 bis 1997 stattfanden, umfassen Listen der Teilnehmer und der gesammelten

Abbildung 2: Zum Bohrcamp, das im April 1995 sechs Tage lang an der tiefsten Stelle des Taimyr-Sees aufgeschlagen wurde, gehörten ein russisches Koch- und Schlafzelt sowie kleinere „Schlafzimmerzelte“.



Proben, und sind in einer mehrere Bände umfassenden Berichtreihe zur Polar- und Meeresforschung verfügbar (Bände 148, 175, 211, 237, 242, 298 und 324).

Während dieser Expeditionen führte die grundlegende Frage der regionalen paläoökologischen Geschichte zu Bohraktivitäten auf einer Reihe von Gewässern. Seesedimente wurden aus dem Lama-See, Labas-See, Lewinson-Lessing-See, Taimyr-See, Portnjagino-See, Changeable-See und dem Fjord-See entnommen (Abbildung 3). 1995 reichte die Länge der Sedimentkerne von wenigen Dezimetern bis zu einer Länge von 22,4 m eines Kerns aus dem Lewinson-Lessing-See.

Ein Beispiel der Erkenntnisse, die aus diesen Sedimentkernen gewonnen werden konnten: Die Dokumentation der Pollen in den Sedimenten des Lama-Sees ermöglichte Rekonstruktionen der Lufttemperatur und des Niederschlags der letzten 12.300 Jahre in der Region und zeigten so auf, wie Biome in Tundra und Steppe sich nach dem Ende der letzten Vereisung an klimatische Veränderungen anpassten.

Abbildung 3: Karte von Sewernaja Semlja und der Taimyr-Halbinsel mit Standorten, an denen im Zeitraum 1993-1997 umfassende, gemeinsame russisch-deutsche Forschungsarbeiten, inklusive der Entnahme von Seesedimentproben, durchgeführt wurden.





Abbildung 4: Über dem Bohrdreibein wurde ein Zelt errichtet, um das Bohren von Sedimentkernen auch bei schlechtem Wetter zu ermöglichen - hier auf dem Lewinson-Lessing-See zu sehen.  
Abbildung 5: Nach ihrer Ankunft am Taimyr-See entspannten sich die Mitglieder der Expedition 1995, T. Ebel, A. Zielke und P. Overduin.

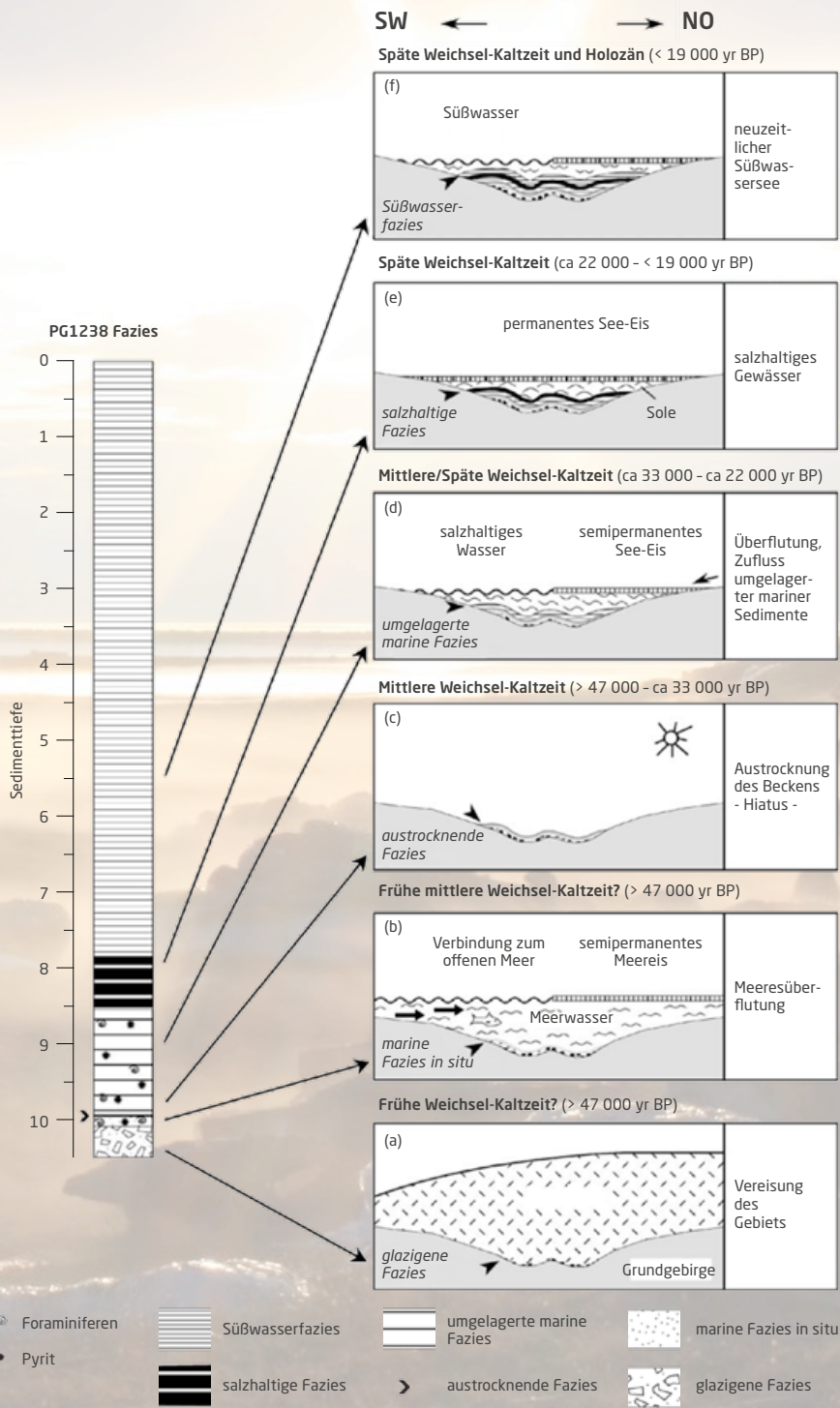


Abbildung 6: Der Sedimentkern vom Changeable-See auf Sewernaja Semlja (links) verknüpft mit der rekonstruierten Umweltgeschichte (rechts; Abbildung adaptiert von Raab et al., 2003).



Seesedimente aus Sewernaja Semlja ermöglichten es uns, unsere Analysen jüngster Umweltbedingungen räumlich weiter nach Norden sowie zeitlich weiter in die Vergangenheit auszudehnen. So konnte die Dynamik der Eiskappen, die ihre Spuren im Changeable-See hinterlassen hatten, nachvollzogen und der Übergang von einer mit Eis bedeckten Landmasse zu einem Süßwassersee mit zwischenzeitlichen marinen Stadien dargestellt werden (Abbildung 6).

Durch den Nachweis, dass es dort während des letzten glazialen Maximums keine Eisdecke gab, trugen die Forschungsergebnisse, basierend auf den Sedimentkernen des Changeable-Sees, entscheidend zur Rekonstruktion der östlichen Grenze des Eurasischen Eisschildes während der letzten Vereisung und zum Erfolg des „ESF Eurasian Ice Sheets“-Projekts bei.

Das Vermächtnis dieser ersten Seesediment-Studien umfasste die Inbetriebnahme der permanenten Forschungsstation Insel Samoillow und die damit zusammenhängenden Forschungsarbeiten im Lenadelta und der Laptewsee. Weitere Projekte sind ebenfalls das Erbe dieser Zusammenarbeit, einschließlich das Bohrprojekt am Elgygytgyn-See (<https://www.awi.de/forschung/geowissenschaften/geophysik/schwerpunkte/seen-als-klimaarchive/elgygytgyn-see.html>) und das derzeitige PLOT-Projekt (<http://www.geologie.uni-koeln.de/2037.html>).

*Pier Paul Overduin, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Martin Melles*

Abbildung 7: Silhouette eines Moschusochsen in der Mitternachtssonne. Moschusochsen auf Taimyr stammen von einer Herde ab, die 1975 aus Nordamerika wiedereingeführt wurde.



## Erste Studien zu Energie-, Wasser- und Spurengasflüssen in Tundraböden: Labas-See und Lewinson-Lessing-See, Taimyr-Halbinsel

Erste Feldstudien zu rezenten Prozessen in Böden begannen in den Gebieten des Labas-See und Lewinson-Lessing-See während der russisch-deutschen TAIMYR-Expeditionen in den Jahren 1994, 1995 und 1996. Ziel war es, die Qualität der organischen Substanz von permafrostbeeinflussten Böden zu charakterisieren und so zur Rekonstruktion der paläoökologischen Bedingungen in Mittelsibirien beizutragen.

Die Vielfalt der sogenannten Gelisole (ein Synonym für Kryosole oder permafrostbeeinflusste Böden) ist durch sechs verschiedene, übergeordnete Bodeneinheiten in den Gebieten des Labas-Sees und des Lewinson-Lessing-Sees dokumentiert. Die Bio- und Pedodiversität zeigt sich an elf verschiedenen Boden-Pflanzen-Frostmuster-Komplexen und an sechs unterschiedlichen Seggen-Moos-Tundratypen des mittelsibirischen feuchten Taimyr-Tieflandes. (Abbildung 1).

Weitere geobotanische Studien mit speziellem Fokus auf Flechten zeigten die Fülle der arktischen Flora und die Diversität der Landschaft auf der Taimyr-Halbinsel.

Abbildung 1: Permafrostbeeinflusste Landschaft im Gebiet des Lewinson-Lessing-Sees mit den typischen, sogenannten Taimyr-Polygonen, Taimyr-Halbinsel, 1995. (Foto: E.-M. Pfeiffer)



Das thermische und hydrologische Regime von Permafrostböden wurden in den Jahren 1994 und 1995 untersucht und die saisonalen Wasser- und Energieflüsse in der Auftauzone (active layer) in der Zeit von Frühling bis Herbst bilanziert. Mittels der sogenannten Time-Domain-Reflektometrie (TDR-Methode) konnte der Gehalt an ungeforenem Wasser bei Bodentemperaturen bis zu  $-12\text{ °C}$  bestimmt werden. Diese Bedingungen ermöglichen die Aktivität von Mikroorganismen und die Bildung von Treibhausgasen auf sehr niedrigem Niveau auch unter Dauerfrost.

Erste  $\text{CH}_4$ -Emissionsraten ( $41\text{-}171\text{ mg CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) aus der feuchten Tundra der Taimyr-Halbinsel wurden mittels geschlossener Emissionskammern (Closed-Chamber-Technik) gemessen. Weitere Arbeiten im Labas-See-Gebiet befassen sich mit der Qualität des Bodenkohlenstoffs auf Basis von verschiedenen C-Fractionen im Boden und ersten Hochrechnungen der Kohlenstoff-Vorräte in der Auftauschicht ( $14,5\text{ kg C m}^{-3}$ ) sowie im obersten Meter des Permafrostsediments ( $30,7\text{ kg C m}^{-3}$ ). Diese ersten russisch-deutschen bodenbezogenen Untersuchungen auf der Taimyr-Halbinsel bildeten die Grundlage für die aktuell laufende Permafrostforschung im Lenadelta und im Kolyma-Indigirka-Tiefeland ab 2000 und den Folgejahren.

*Eva-Maria Pfeiffer, Julia Boike, Mikhail P. Zhurbenko, Dmitry Yu. Bolshiyarov*

Abbildung 2: Typischer polygonaler Eiskeil in Tundraböden - klassifiziert als Typic Glaciestels - welcher sich durch glazische (eisreiche) Schichten und eine hohe Ansammlung an organischen Stoffen unter sehr feuchten und kalten Bedingungen auszeichnet. (Foto: E.-M. Pfeiffer)



## Untersuchungen von Permafrost-Sequenzen in der Taimyr-Tiefebene (1994-1996)

Aufgrund vorliegender Erkenntnisse wurde angenommen, dass die zentrale Taimyr-Tiefebene im Spätpleistozän nicht von Inlandseismassen bedeckt war und sich zu dieser Zeit bereits Permafrostlandschaften entwickeln konnten. Im Rahmen unseres Teilprojektes wurden darum Untersuchungen zum kryogenen Aufbau der Permafrostabfolgen in der Taimyr-Tiefebene durchgeführt. In Kombination mit absoluten Altersdatierungen, paläontologischen, sedimentologischen und geochemischen Methoden sollten sie helfen, die Paläoumweltentwicklung dieser Region zu klären.

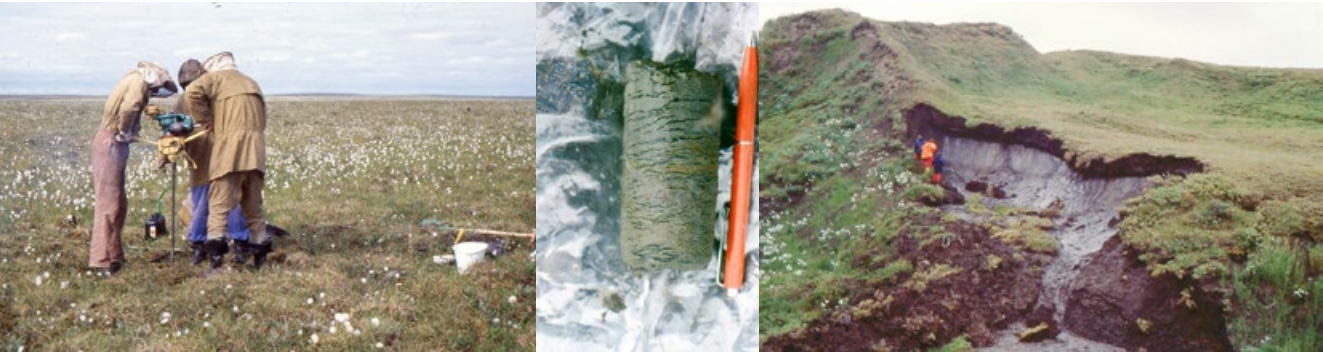
Die Untersuchungen konzentrierten sich auf zwei Gebiete: die nördliche Uferzone des Labas-Sees und das Kap Sabler am N-Ufer des Taimyr-Sees. Das am Labas ausgewählte Untersuchungsgebiet mit Höhenlagen zwischen 40 m NN (Seeoberfläche) und 115 m NN bot außerdem gute Bedingungen, um rezente geokryologische und reliefbildende Prozesse in der typischen Tundra zu untersuchen. An den stark gegliederten und durch Thermoerosion geprägten Uferhängen standen zahlreiche Aufschlüsse von Permafrostsequenzen für die

Abbildung 1: Unser Lager am Labas 1995. Auf dem See sind Reste der Eisdecke, am östlichen Ufer perennierende Firnfelder zu erkennen.

komplexen paläogeographisch-geokryologischen Untersuchungen zur Verfügung. Außerdem wollten wir versuchen, im nördlichen Uferbereich des Labas-Sees Belege für den Verlauf der Grenze der letzten Inlandeisdecke zu gewinnen. Aufgrund morphologischer Besonderheiten von Thermokarstsenken, die wir in Luftaufnahme beobachten konnten, vermuteten wir, dass im Permafrost konservierte Todeiskörper dieser uralten Gletscherdecke vorhanden sind.

Unser Untersuchungsgebiet am Labas-See erreichten wir nach Zwischenstopp in St. Petersburg, Charterflug von St. Petersburg nach Chatanga und Helikopterflug von Chatanga jeweils Mitte Juli. Der riesige Labas-See (Durchmesser ca. 30 km) und zahlreiche benachbarte kleinere Seen zeigten bei unserer Ankunft in beiden Jahren Reste der Eisdecke auf der Oberfläche, die aber in den nächsten Tagen durch steigende Temperaturen und stärkere Winde allmählich zerstört wurden. Die steilen Uferhänge waren oft noch von Schnee bedeckt und in nivalen Nischen erhielten sich Firnreste teilweise bis zum nächsten Sommer. Höher gelegene flache Areale waren aber bereits von der typischen Tundren-Vegetation bedeckt und an den südexponierten oberen Uferhängen fanden wir bereits üppig blühende Wiesenflecken. Aber auch riesige Mückenschwärme begrüßten uns in der Tundra.

Unser Lager konnten wir auf einer breiten, relativ ebenen Terrassenfläche aufbauen, die an die deltaförmige Mündung des Flusses Tolton-Pastakh-Yuryakh in den Labas-See angrenzt. Im Fluss konnten wir Trinkwasser entnehmen. Im kleinen Delta des Flusses hatte sich durch die jährlich wiederkehrenden Eisbewegungen ein Wall aus grobkörnigen Sedimenten aufgebaut, der ein kleines Becken mit ruhigem, etwas wärmerem Wasser abgrenzte. Bei günstigem Wetter wurde dieses von uns als Freibad genutzt. Am zweiten Tag, nachdem wir unsere Zelte aufgebaut, das Küchenzelt eingerichtet und das Boot aufgebaut hatten, erschienen Gäste - Dolganen- und Nganasanen-Familien, die im Sommer am See wohnen und Fischfang betreiben. Sie kamen mit ihren Booten, um uns kennenzulernen. Der Kontakt mit ihnen sollte sich für uns auszahlen. Neben Interessanten, was wir über ihr Leben erfuhren, konnten sie uns zusätzlich mit ausgezeichnetem frischen Fisch versorgen, den sie in großen Mengen fingen, aber in dieser komplizierten Zeit nicht wie früher verkaufen konnten. Umfangreiche eingefrorene Fisch- und Rentierfleisch-Vorräte lagerten sie in einem riesigen Eiskeller am Seeufer. Hilfreich war auch die Möglichkeit, bei einer Familie ab und zu die kleine adrette Sauna zu nutzen. Wertvoll für unsere Arbeit waren wichtige Hinweise auf frische Aufschlüsse von Grundeiskörpern und andere interessante Erscheinungen, die wir von ihnen erhielten. Wir konnten uns bei ihnen jeweils



zum Saisonende mit nicht aufgebrauchten Lebensmitteln und Treibstoffvorräten revanchieren. Im zweiten Jahr übergaben wir ihnen mehrere Seesäcke mit am gesamten AWL gesammelter Kleidung, die mit großer Dankbarkeit von ihnen entgegengenommen wurde.

In den Sommerwochen beider Jahre wurden zahlreiche Uferaufschlüsse untersucht und Proben für die verschiedenen Laboruntersuchungen entnommen. Auf dieser Grundlage konnte ein schematischer Schnitt durch die Permafrostsequenzen erstellt werden. Daneben nutzten wir ein russisches transportables, motorbetriebenes kleines Bohrgerät, das uns Kernproben von gefrorenen Sedimenten und Grundeis bis zu einer Tiefe von 7 m lieferte. Insgesamt wurden von unseren felderfahrenen russischen Partnern 20 Bohrungen durchgeführt, die es uns erlaubten, die geokryologischen Bedingungen an verschiedenen lokalen Standorten zu charakterisieren.

Als wichtigstes Paläoumweltarchive dienten uns synchron mit ihrer Akkumulation in Permafrost übergegangene Sedimentserien mit polygonalen Eiskeilen. In ihnen sind stets Pollen und häufig fossile Reste von Pflanzen, Diatomeen und Knochen der Mammut-Fauna tiefgefroren enthalten. Zusammen mit Daten zur Isotopenzusammensetzung des Grundeises und Altersdatierungen konnten wir erfolgreich die Grundzüge der Klima- und Umwelt-Entwicklung der Region im Spätquartär rekonstruieren. Von besonderem Interesse erwiesen sich dabei die 1996 durchgeführten Feldarbeiten am Kap Sabler und die Ergebnisse der nach-

Abbildung 2: Die Bohrbrigade in Aktion. Beachtenswert sind die vor der Mückenplage schützenden Imkerhüte.

Abbildung 3: Bohrkern eines Permafrost-Bodens mit charakteristischen Eislinsen.

Abbildung 4: Nach Hangrutschungen wurde der obere Teil des begrabenen Gletschereises unter einer geringmächtigen saisonalen Auftauschicht sichtbar.



folgenden Laboruntersuchungen an den gewonnenen Probenserien aus Permafrostsedimenten und der in ihnen enthaltenen Eiskeile. Die Untersuchung der in den Ablagerungen enthaltenen Pflanzenreste erlaubte zum ersten Mal, einen eindeutigen Beweis für die Existenz von Steppenvegetation während der letzten Eiszeit zu erbringen. Ähnliche Relikte von Steppenlandschaften existieren heute nur noch in bestimmten Gebieten Jakutiens, die sich durch extrem kaltes Kontinentalklima auszeichnen.

Massiven Schichteiskörper, die als Relikte der letzten Inlandeisdecke angesehen werden können, konnten wir 1994 nicht beobachten. Aber im Sommer 1995 rutschte nach starken Niederschlägen unweit unseres Lagers ein großer Steilhang ab und wir konnten zum ersten Mal in dieser Region begrabenes Gletschereis eindeutig nachweisen. Begeistert wurde dieser Fund mit Whisky und Gletschereis von der ganzen Gruppe gefeiert.

Am Ende der zweiten Feldsaison bescherten uns ökonomische Ereignisse zusätzlich Zeit für Untersuchungen und hochinteressante Ergebnisse. Im August 1995 wurde durch die damalige russische Regierung der Rubel massiv abgewertet. Die finanziellen Mittel (Bargeld!), die uns für die Rückführung der Expeditionsgruppen aus dem Gelände zur Verfügung standen, reichten nicht aus. Dima Bolshiyarov, der für die Organisation der gesamten Expedition verantwortlich war, musste darum nach Petersburg fliegen, um die entsprechenden im ARRI bereitliegenden zusätzlichen Finanzmittel übernehmen zu können. Da in der Tundra bereits Herbstwetter mit starken Regenfällen eingesetzt hatte, bescherte uns dieser verlängerte Aufenthalt zwar ungemütliche Tage bei zu Ende gehenden Lebensmittelvorräten, aber einen zweiten noch umfangreicheren Aufschluss mit Gletschereis. Unsere Dolganen berichteten uns, dass am Seeufer nach großen Erdbeben große Eiskörper zu sehen wären. Sofort fuhren einige von uns mit dem schnelleren Boot der Fischer hin. Und wir sahen direkt am Ufer, unweit des Eiskellers der Fischer, massive Eiskörper mit für Gletschereis typischem Aufbau. Im benachbarten Taleinschnitt war unter einer weiten flachen Senke und einer geringmächtigen saisonalen Auftauschicht auf einer breiten Front die Bodendecke abgerutscht und ebenfalls Gletschereis freigelegt. Dieser Aufschluss lieferte uns den endgültigen Beweis dafür, dass Zungen eines Inlandeises zweifellos das Nordufer des Labas-Sees erreicht hatten. Diese Ergebnisse fanden Anwendung bei der Rekonstruktion der Verbreitung der Inlandeis-Decken in Sibirien.

*Christine Siegert, Alexander Yu. Dereviagin*



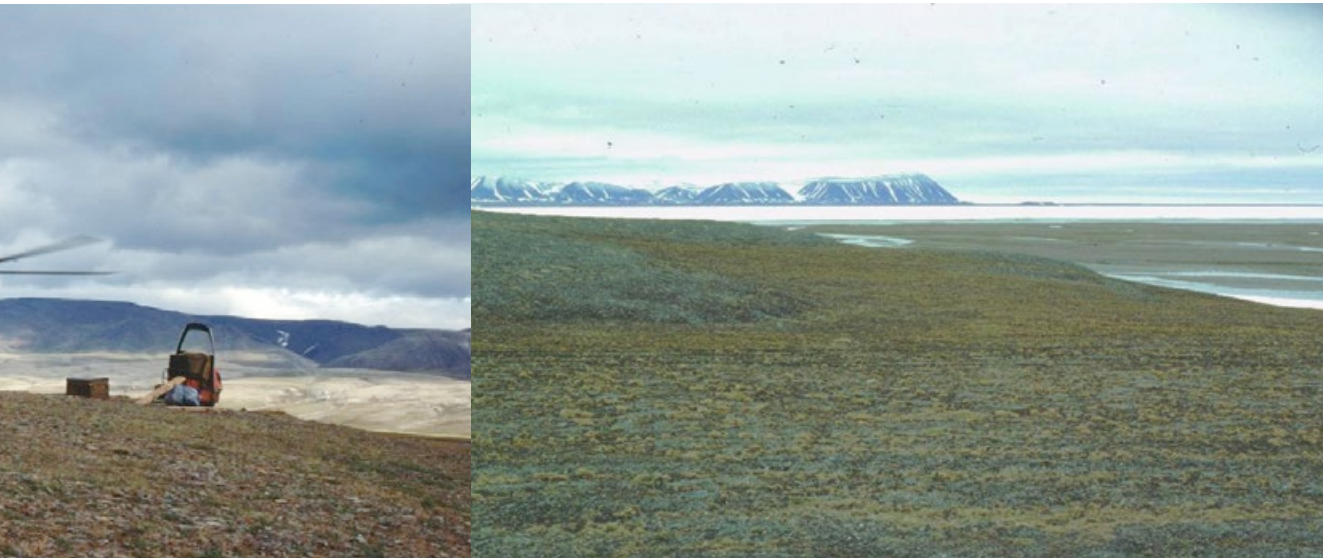
## Kohlenstoff in den arktischen Wüstenböden von Sewernaja Semlja

Als Teil der russisch-deutschen Zusammenarbeit im Rahmen der „Expedition Taymyr 1995“ führte eine Pilot-Expedition 1995 auf dem Sewernaja Semlja-Archipel erste Kohlenstoffmessungen in Permafrostböden im Territorium der russischen Hocharktis durch. Ziel dieser Vorexkursion war es, die Rahmenbedingungen für künftige Forschungsfahrten zu See-Beprobungen, Gletscher-Borhungen, Bodenbildung, mikrobiellen Bodenuntersuchungen und weiteren Studien auf der Inselgruppe von Severnaya Semlja zu erfassen.

Ein Team aus deutschen, japanischen und russischen Wissenschaftlern (siehe Abbildung 1) brach von der russisch-deutschen Feldbasis am Ufer des Lewinson-Lessing-Sees auf, wo übrigens gerade das japanische Team an zwei Abenden in Folge Gesangswettbewerbe zwischen den Nationen gewonnen hatte. Nach einem kurzen Besuch des Labas-See-Gebietes und des Kap Tscheljuskin auf der Taimyr-Halbinsel flog das internationale Team weiter zur Inselgruppe Sewernaja Semlja (siehe Abbildung 2) und arbeitete dort von der Feldbasis „Prima Station“ auf der Bolschewik-Insel aus, welche 1994 in ein hydrometeorologisches Obser-

Abbildung 1: Team der Sewernaja Semlja Pilotexpedition 1995. Von links nach rechts: T. Yamanouchi, G. Guggenberger, O. Watanabe, H. Kanda, S. Takanashi, russischer Kollege, M. Zhurbenko, D. Bolshiyarov, E.-M. Pfeiffer, M. Böliter. (Foto: H.-W. Hubberten)

Abbildung 2: Flug mit einem russischen Helikopter von der Taimyr-Halbinsel zum Sewernaja Semlja-Archipel im Jahr 1995.



vatorium des AARI umgewandelt worden war. Das internationale Team besuchte verschiedene Forschungsstätten mit dem Helikopter und nahm Boden- und Pflanzenproben von den verschiedenen Inseln Oktoberrevolution, Konsomolsk und Bolschewik. Die deutschen und japanischen Wissenschaftler waren von der weitläufigen, unvergesslichen und riesigen Welt der sibirischen Arktis tief beeindruckt und entschlossen sich, die gemeinsame Erforschung dieser einzigartigen, hochpolaren Region Russlands fortzusetzen. Während die japanisch-russischen Untersuchungen nicht ausgeweitet werden konnten, florierte die russisch-deutsche Zusammenarbeit und neue Permafrostexpeditionen wurden in den darauffolgenden Jahren auf der Taimyr-Halbinsel, im Plutorana-Gebirge und im Sewernaja Semlja-Archipel durchgeführt. 1998 wurde die interdisziplinäre russisch-deutsche Permafrostforschung im Lenadelta und dessen Hinterland fortgesetzt.

Eine erste Charakterisierung und Analyse der organischen Substanz in verschiedenen Gelisolen an 12 Standorten der Inselgruppe Severnaya Zemlya zeigte die niedrigen Kohlenstoffgehalte (0,1-1,3 % Corg) in den oberen 20 cm Bodentiefe der höheren Frostmuster-Bereiche (unsortierte Kreise und Streifen). In den tieferen Bereichen der Frostmusterstrukturen konnten deutlich höherer organische Kohlenstoffgehalte mit Werten von 1,6 bis 7, 1 % Corg in den oberen

Abbildung 3: Hocharktische Landschaft auf der Bolschewik-Insel und blau blühende Vergissmeinnicht (*Eritrichium villosum*), Sewernaja Semlja, 1995. (Foto: E.-M. Pfeiffer)



20 cm-Bodentiefe gemessen werden. In Abhängigkeit von der Bodenfeuchte und der Präsenz von Vegetation in geschützten Reliefpositionen sind die arktischen Böden der Inselgruppe Severnaja Semlja nur schwach entwickelt und stellen nur eine schwache Senke für atmosphärischen Kohlenstoff dar. Die wesentlichen Bodenbildungsprozesse sind durch die Anreicherung von organischem Material im Oberboden, die Verlagerung von Eisenoxiden durch Wassereinfluss, die Durchmischung durch Frost (Kryoturbation) und die Bildung von Frostmusterstrukturen gekennzeichnet (siehe Abbildung 4).

Die arktischen Tundren der typischen Boden-Vegetations-Frostmuster-Komplexe auf Sewernaja Semlja sind durch das Vorkommen von Arten wie *Dryas octopetala*, *Salix polaris*, *Cassiope tetragona* und Flechten wie *Acarospora putoranica* und *Sticta arctica* gekennzeichnet. Die Flechte *Teloshistes contortuplicatus* wurde als neue Art in der Hocharktis von Sewernaja Semlja bestimmt.

*Eva-Maria Pfeiffer, Mikhail P. Zhurbenko, Dimitry Yu. Bolshiyarov*

Abbildung 4: Gemusterte Bodenformation und Beispiel eines permafrostbeeinflussten Bodens (Psammentic Aquiturbel) auf der Bolschewik-Insel, Sewernaja Semlja, 1995. (Foto: E.-M. Pfeiffer)

Abbildung 5: Diversität und Zusammensetzung von Flechten auf Sandstein (mit typischem Protosysrozem) auf der Bolschewik-Insel, Sewernaja Semlja, 1995. (Foto: E.-M. Pfeiffer)

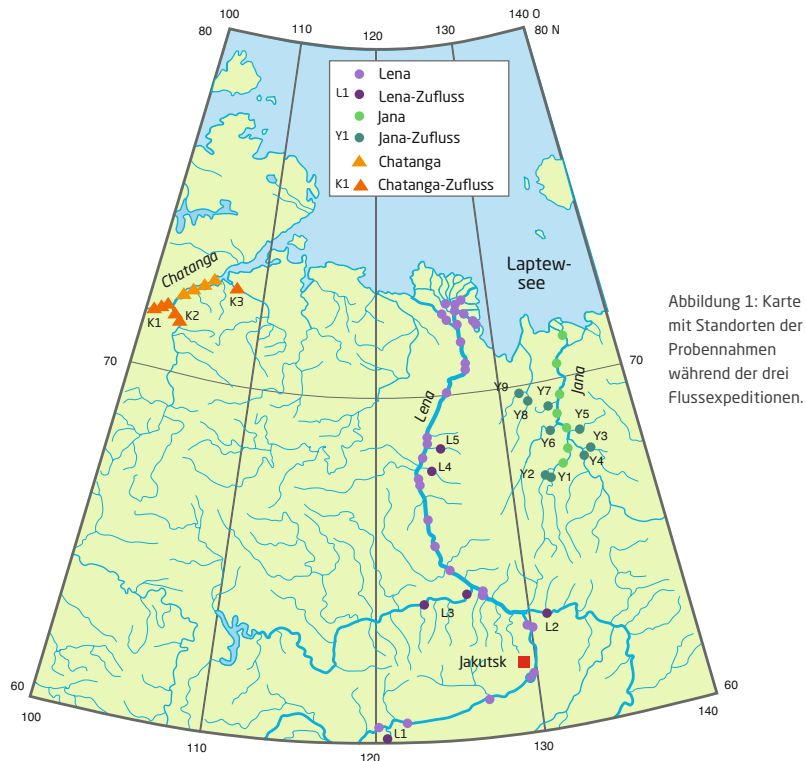


Abbildung 1: Karte mit Standorten der Probenahmen während der drei Flussexpeditionen.

## Hydrologie, Geochemie und Sedimenttransport in den Flüssen Sibiriens - Das SYSTEM LAPTEV SEA Projekt 1994-1997

Die Erforschung der sibirischen Flüsse war ein integraler Bestandteil des SYSTEM LAPTEV SEA, eines russisch-deutschen Forschungsprojekts, das seit 1994 durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung und das russische Ministerium für Forschung und Technologie gefördert wird. Das übergreifende Ziel des Projekts war es, die modernen Eigenschaften des transpolaren Eisdrift-Systems der Arktis sowie seine Variationen im Verlauf der geologischen Vergangenheit zu verstehen. Heutzutage transportiert Meereis den Großteil der Sedimente, die in das Zentrum des Arktischen Ozeans gelangen. Diese Stoffe stammen hauptsächlich von den breiten sibirischen Schelfen, wo sie im arktischen Meereis eingeschlossen werden. Die Region der Laptevsee gilt als die Hauptquelle des sedimentreichen Meereises.

Das SYSTEM LAPTEV SEA Projektkonsortium konzentrierte sich auf die Erforschung von mineralogischen und geochemischen Parametern, die dazu dienen



können, die Mechanismen des modernen und alten Sedimenttransports durch das Meereis zu rekonstruieren und somit zu verstehen. Als Teil des Projekts charakterisierte unser Team die Sedimente, die von den sibirischen Flüssen transportiert werden (siehe Tabelle 1). Andere Projektteams untersuchten das sedimentreiche Meereis, marine Oberflächensedimente auf dem Schelf und im zentralen Arktischen Ozean sowie Sedimentkerne hinsichtlich Variationen in der geologischen Vergangenheit.

Das Probenentnahme-Programm umfasste Wasser, Bodensedimente sowie Schwebstoffe zur Qualifizierung des jüngsten vom Kontinent stammenden Stoffeintrags. Proben wurden an zahlreichen Stationen entlang der größten Flüsse und ihrer Nebenflüsse entnommen (siehe Abbildung 1).

Wissenschaftliche Untersuchungen umfassten (a) eine quantitative Prüfung des Wasser- und Sedimentaustrags basierend auf hydrologischen Daten und Sedimentfracht und (b) die Charakterisierung der Bodensedimente und Schwebstoffe basierend auf mineralogischen und geochemischen Daten. Mehrere Parameter wurden getestet, um den Stofftransport jedes Flusses zu bestimmen und Material aus unterschiedlichen Flüssen voneinander zu unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zusammensetzung der Flusssedimente die Geologie des Einzugsgebietes eines jeden Flusses widerspiegeln. Eine spezifische Schwermi-

Abbildung 2: „Prof. Makkawejew“ landet auf einer Sandbank im Fluss Lena an, Juli 1995.

neralzusammensetzung charakterisiert die Bodensedimente jedes Flusses. Diese Zusammensetzung kann genutzt werden, um spezifische, mit Schwermineralen versetzte Areale innerhalb der sibirischen Schelfe voneinander abzugrenzen. Schwerminerale werden aber hauptsächlich als Bodensedimente transportiert. Schwebstoffanalysen wiederum sind besser geeignet, um den Transport über lange Distanzen hinweg zu verstehen. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde die Tonmineralzusammensetzung erfolgreich dazu genutzt, um Areale zu kartieren, die mit bestimmten Flüssen in Verbindung stehen. Die geochemischen Eigenschaften der Schwebstoffe sind die besten Analysehilfsmittel, um das Material aus den Flüssen eindeutig den Schelfen und den Arealen tiefer im Arktischen Ozean zuzuordnen. Die Zusammensetzung der Metalle der Seltenen Erden und die isotopische Zusammensetzung von Sr und Os, welche beide eng mit der Zusammensetzung der Gesteine in den Einzugsgebieten zusammenhängen, können insbesondere dafür genutzt werden, die Flusssedimente auf den Schelfen und in Sedimentkernen des zentralen Arktischen Ozeans zu identifizieren. Ergebnisse der drei Expeditionen wurden in 10 Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht.

#### *Volker Rachold*

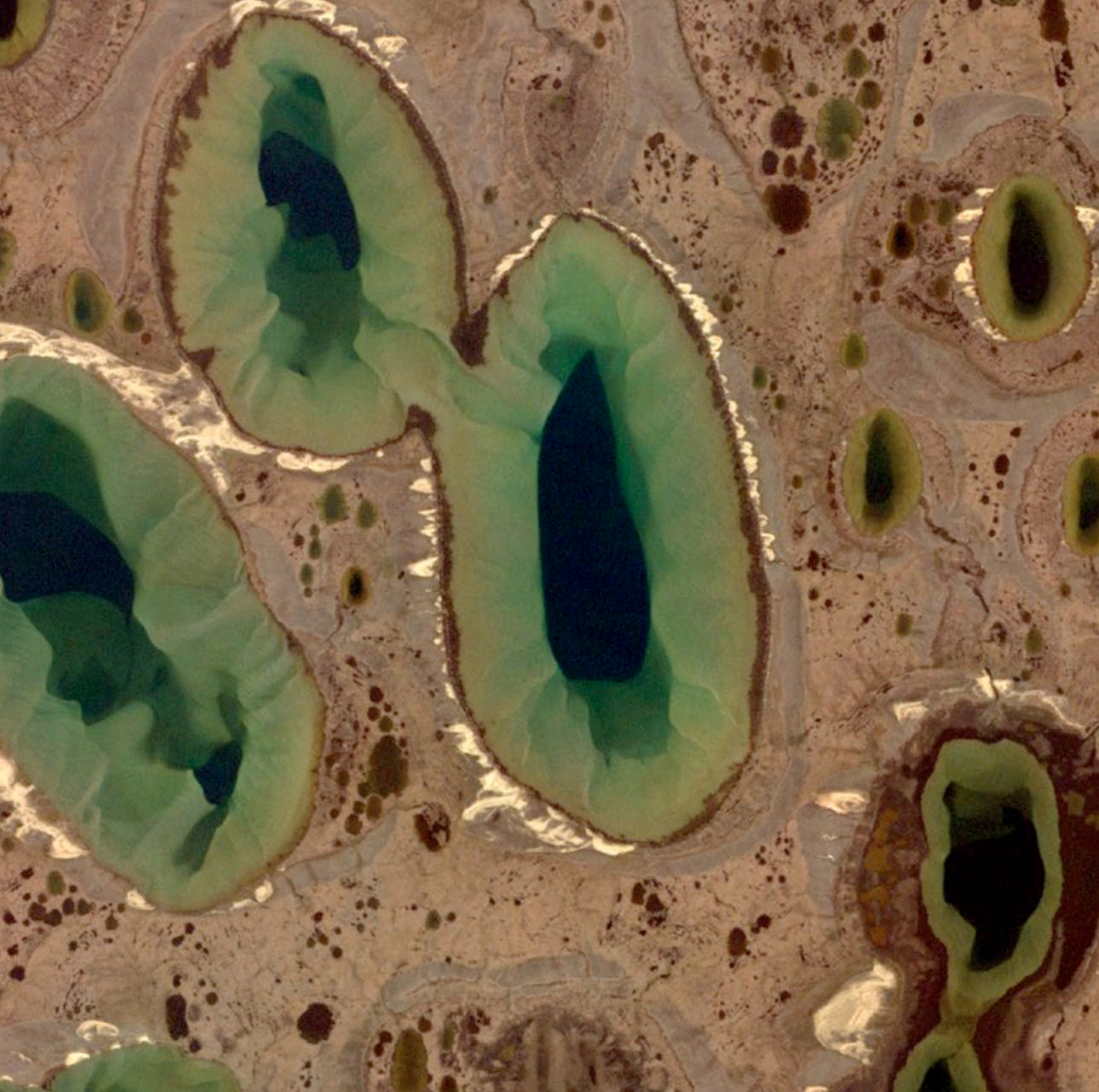
	Lena 1994	Lena/Jana 1995	Chatanga 1996
<b>Flüsse</b>	Lena Fluss und Delta sowie Zuflüsse	Lena Fluss und Delta, Jana, Omolj und Olenjok sowie Zuflüsse	Chatanga und Zuflüsse
<b>Zeitraum</b>	5. Juli bis 3. August	26. Juni bis 7. September	1. Juli bis 20. August
<b>Schiffe</b>	„Prof. Makkawejew“	„Prof. Makkawejew“, „Eisberg“ und „Sarja 9“	„Lotsman“
<b>Teilnehmer</b>	Andrey M. Alabyan, Jörg Hermel, Vyacheslav N. Korotaev, Volker Rachold and Alexander A. Zaitsev	Andrey M. Alabyan, Erich Hoops, Vyacheslav N. Korotaev, Volker Rachold and Alexander A. Zaitsev	Erich Hoops, Irina J. Kirtsidely, Volker Rachold and Alexander W. Ufimzew
<b>Organisatoren</b>	AWI Potsdam und Geographische Fakultät der Staatlichen Universität Moskau	AWI Potsdam und Geographische Fakultät der Staatlichen Universität Moskau	AWI Potsdam und Arktisches und Antarktisches Forschungsinstitut (AARI)

Tabelle 1: Von 1994 bis 1996 wurden drei Schiffsexpeditionen zu den größten in die Laptewsee mündenden Flüssen organisiert.

Die Argaseen (RapidEye\_2010-07-06) liegen in einer sandigen Ebene und haben breite, flache Schelfabschnitte (<2 m Wassertiefe) und tiefe Zentralbecken. Der Nikolajsee (teilweise von Eis bedeckt) hat mehrere Becken (maximal 17 m Wassertiefe) und ist in seiner größten Ausdehnung je 8km lang und breit.

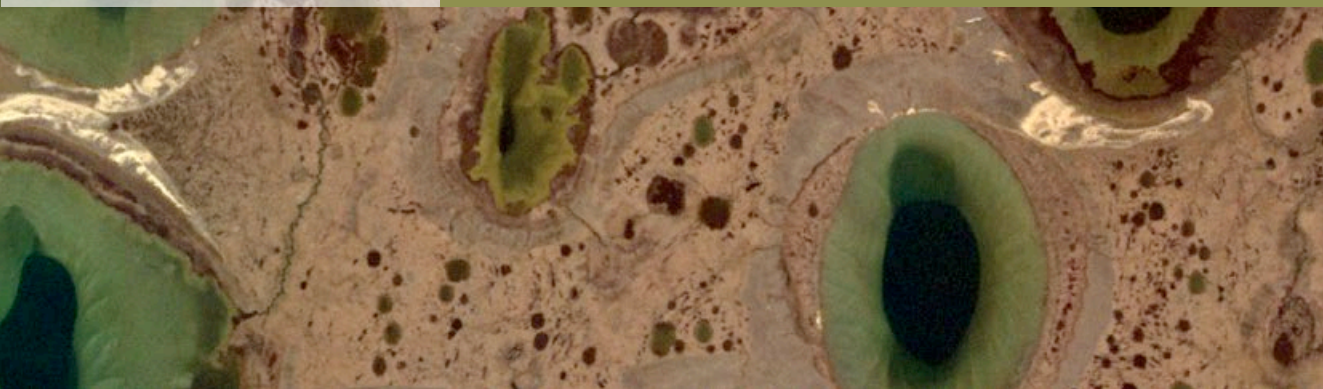


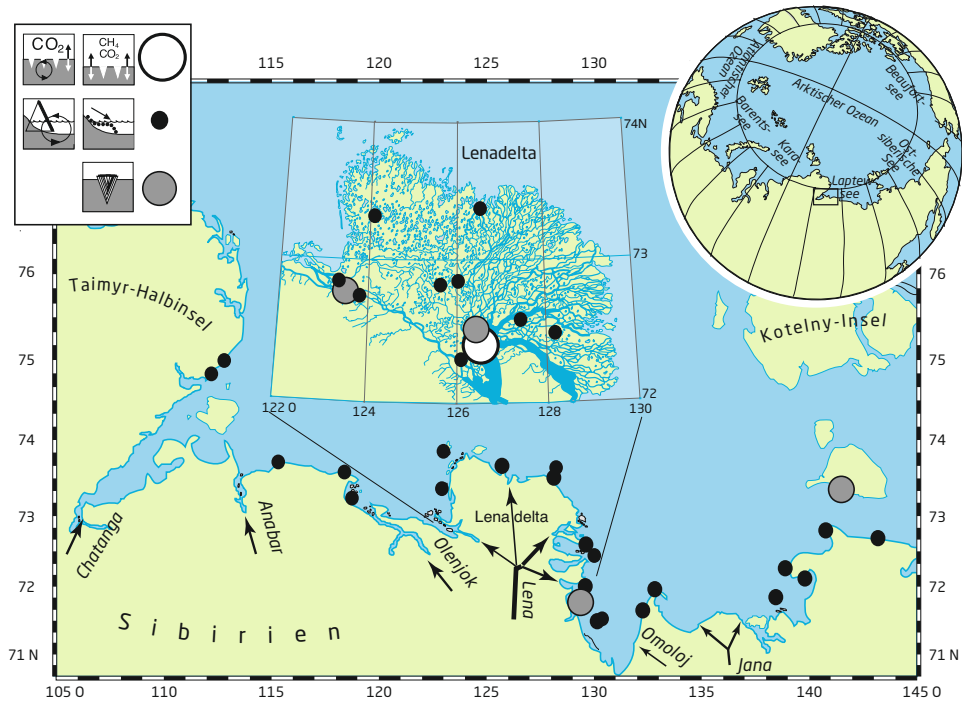




2.

Der Beginn der Lena-  
Expeditionen  
1998-2002





## Initiierung des Forschungsprojekts Lenadelta: Wissenschaftliche Strategie, Kooperation und Logistik

Die Förderung sowohl des SYSTEM LAPTEV SEA als auch des TAYMYR-Projekts endete 1996. Es wurde deutlich, dass die marinen und terrestrischen Studien in einem zukünftigen Projekt vereint werden sollten. Unter der Leitung von Heidemarie Kassens (GEOMAR) und Hans-Wolfgang Hubberten (AWI) entwickelten die Projektmitarbeiter ein Konzept für dieses neue, SYSTEM LAPTEV SEA 2000 genannte Projekt. Es basierte auf den Ergebnissen der Projekte SYSTEM LAPTEV SEA und TAYMYR aber ging zudem auch völlig neue wissenschaftliche Problemstellungen an. Folgende Themen wurden identifiziert:

- A. Saisonale Variabilität moderner Flüsse in Permafrostgebieten
  - Bilanz der Treibhausgase (Kohlenstoffdioxid und Methan) und Prozessstudien der Methanbilanz
  - Wasser- und Energieflüsse in Permafrostböden
  - Mikrobielle Gemeinschaften und Kohlenstoffdioxidflüsse in Permafrostböden

Abbildung 1: Karte mit Standorten der Lena-Expeditionen 1998-2001.

- B. Umweltreaktionen des Land-Meer-Systems der sibirischen Arktis in den letzten 100 Jahren
  - Marine Umweltreaktionen und Stoffbilanz
  - Atmosphärischer Eintrag von Radionukliden
  - Sensibilität der marinen Ökosysteme der Arktis
- C. Land-Ozean-Interaktionen und der Einfluss auf die Sedimentbilanz des Lenadeltas
  - Ökologische und klimatische Geschichte des Lenadeltas
  - Partikeltransport im Delta-Schelf-System
- D. Landsystem: kurz- und mittelfristige Klima-Trends in der sibirischen Arktis
  - terrestrische Klimasignale in eisreichen Permafrostablagerungen
- E. Marines System: langfristige Klima-Trends in der sibirischen Arktis
  - Ursachen und Auswirkungen kurz- und mittelfristiger klimatischer Trends in Permafrostregionen
  - Akustische Signaturen des submarinen Permafrosts

Heidemarie Kassens organisierte im November 1997 einen SYSTEM LAPTEV SEA Workshop, ausgerichtet von Martin Antonow an der Universität Freiberg. Der Workshop war im Hinblick auf das Konzept des wissenschaftlichen Programms ein Meilenstein. Der Workshop führte russische und deutsche Mitarbeiter der Projekte SYSTEM LAPTEV SEA und TAYMYR zusammen. Das Konzept des SYSTEM LAPTEV SEA 2000 Projekts umfasste zahlreiche terrestrische und marine Expeditionen. Diese wurden ebenfalls auf dem Workshop diskutiert. Man einigte sich, dass das GEOMAR die marinen TRANSDRIFT-Expeditionen in Zusammenarbeit mit dem AARI organisieren würde und das AWI-Potsdam die LENA-Landexpeditionen in enger Zusammenarbeit mit dem AARI, dem Melnikov-Permafrost-Institut Jakutsk (MPI) und dem Lenadelta-Reservat (LDR) organisieren würde.

Während der logistische Rahmen der marinen Expeditionen auf den Erfahrungen vergangener TRANSDRIFT-Expeditionen beruhen würde, mussten die logistischen Voraussetzungen für die terrestrischen LENA-Expeditionen von Grund auf entwickelt werden. Dmitry Bolshyanovs Gruppe am AARI konnte sich um generelle Fragen wie Forschungsgenehmigungen, Zollverfahren und die Logistik der Flüge kümmern. Für die Logistik vor Ort mussten jedoch neue Partnerschaften und logistische Gegebenheiten erarbeitet werden. Um die Grundlagen zu schaffen, reisten Martin Antonow und Volker Rachold im April 1998 nach Jakutsk um sich mit Mikhail Grigoriev zu treffen. Das Reiseprogramm schloss mehrere



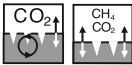
Treffen in Jakutsk und Tiksi ein, um die Logistik für die Forschungsstandorte und den Transport im Lenadelta zu besprechen und Verträge auszuhandeln. Unglücklicherweise blieb die Reisegruppe aufgrund schlechten Wetters in Batagai am Fluss Jana stecken. Die nötigen Vorbereitungen konnten dennoch getroffen werden: Die Partnerschaften mit der Tiksi Hydrobase (Dmitry Melnichenko) und dem LDR (damals Alexander Gukov), die 1998 im ersten Jahr der LENA-Expeditionen, begründet wurden, stellten sich als äußerst erfolgreich heraus und bestehen noch heute, 20 Jahre später.

Während dieses Treffens fassten die Teilnehmer auch den wichtigen Entschluss, die Forschungsstation Insel Samoillow im zentralen Lenadelta statt der Lena-Nordenskjöld-Station als Forschungsbasis für die Permafroststudien zu nutzen. Mikhail Grigoriev und Volker Rachold trafen diese Entscheidung, da die Lena-Nordenskjöld-Station sich in einer gebirgigen Tundrazone statt einer für das Lenadelta typischen feuchten polygonalen Tundrazone befindet. Um die feuchte Tundra des Lenadeltas untersuchen zu können, hätte der Bykowski-Kanal, der größte Kanal des Lenadeltas, mit kleinen Booten überquert werden müssen, was nur bei guten Wetterbedingungen möglich ist. Die Insel Samoillow wurde daher aufgrund logistischer und wissenschaftlicher Erwägungen die Basis für die russisch-deutsche Permafrostforschung.

Abbildung 2: Das Samoillow-Team von 1998.  
Abbildung 3: Das Lenadelta-Team von 1998.



Die erste Expedition (LENA 1998) mit rund 30 Teilnehmern konnte bereits ein paar Monate, nachdem die logistischen Grundsteine gelegt worden waren, unternommen werden. Sie fand unter der Leitung von Mikhail Grigoriev und Volker Rachold statt und befasste sich mit den terrestrischen Forschungszielen des Projekts SYSTEM LAPTEV SEA 2000, mit einem Fokus auf Permafrost. Drei Teams führten die Untersuchungen durch:



#### Team Samoilov

Saisonale Variabilität moderner Flüsse in Permafrostböden

- Bilanz der Treibhausgase (Kohlenstoffdioxid und Methan) und Prozesstudien der Methanbalance
- Wasser- und Energieflüsse in Permafrostböden
- Mikrobielle Gemeinschaften und Kohlenstoffdioxidfluss in Permafrostböden



#### Team Lenadelta

Land-Ozean-Interaktionen und der Einfluss auf die Sedimentbilanz des Lenadeltas

- Ökologische und klimatische Geschichte des Lenadeltas
- Partikeltransport im Delta-Schelf-System



#### Team Permafrost

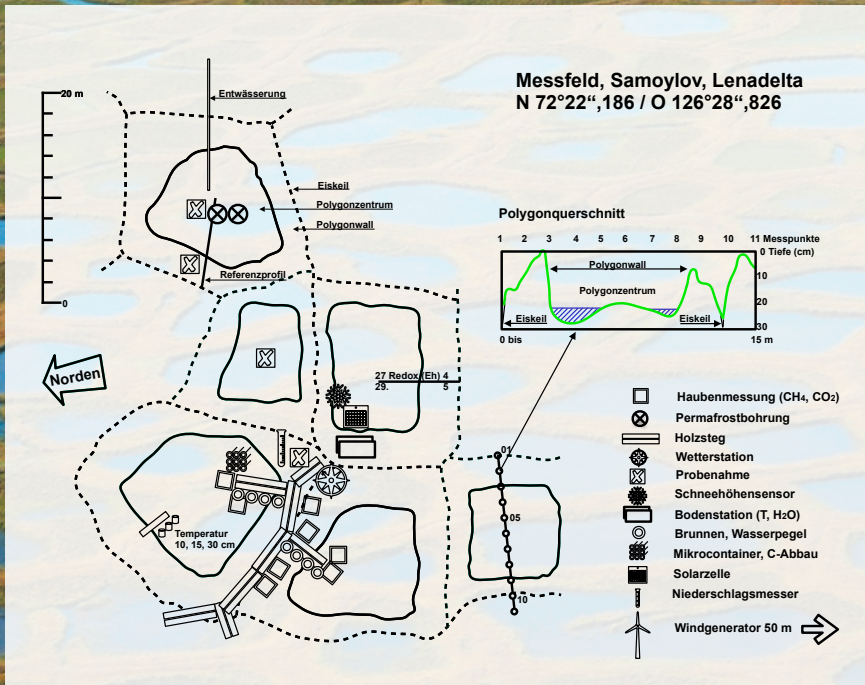
Landsystem: kurz- und mittelfristige Klima-Trends in der sibirischen Arktis

- terrestrische Klimasignale in eisreichen Permafrostablagerungen

Anschließende Expeditionen wurden auf ähnliche Weise organisiert, auch wenn sich die Zusammensetzung und Forschungsfelder mancher Teams änderten.

*Volker Rachold, Martin Antonow, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyonov, Eva-Maria Pfeiffer*

Abbildung 4: Das Permafrost-Team von 1999.



## Die ersten Jahre der boden- und klimabezogenen Permafrostforschung auf Samoilow und Umgebung (Untersuchungen 1998-2001)

Die multidisziplinäre Permafrostforschung begann auf der Insel Samoilow im Jahr 1998 und basierte auf den Ergebnissen früherer Untersuchungen (Pushchino Conference 1992 & 1994, LAPTEV SEA 2000 Projekt, Expeditionen TAYMYR 1994-1997). Sie stellte den Ausgangspunkt für viele noch offene Forschungsfragen zu klimarelevanten Prozessen im permafrostbeeinflussten Böden, zu den aktuellen Sedimentationsbedingungen, der Umweltgeschichte des Lenadeltas und weiteren relevanten Themen zum eisreichen Permafrost dar.

In den Jahren 1998 bis 2001 teilten sich russische und deutsche Wissenschaftler (bis zu 15 Forscher in der Hochphase im Sommer) eine kleine Küche zum Essen und für Gespräche sowie ein kleiner Arbeitsraum, um Proben vorzubereiten (Mikroskopieren, Trocknung und Beschreibung der Proben, etc.). Ein Raum wurde als anfängliches Gaschromatographielabor für die Spurengasbestimmung und

Abbildung 1: Schema der installierten Instrumente der Wetter- und Bodenstation auf der polygonalen Tundra auf Samoilow im Jahr 2001. (Skizze: G. Stoof; Foto: Konstanze Piel)

bodenmikrobielle Laboruntersuchungen genutzt, ein anderes Zimmer diente als Schlafplatz für drei Personen. Alle anderen Teilnehmer lebten in kleinen Zelten und gönnten sich einmal pro Woche die Banja (Saunahütte) neben einem Süßwassersee. Ein Koch des Lenadelta-Reservats (LDR) sorgte für die Verköstigung der Expeditionsmitglieder. Gutes Essen sorgte für gute Laune unter den hart arbeitenden Wissenschaftlern. Viele deutsche Teilnehmer lernten Neues über die Zubereitung von Fisch, Fleisch und Brot. Die gesamte Gruppe war für die Qualitätsprüfung der frischen Nahrungsmittel wie Äpfel, Zitronen und Kohl verantwortlich. Diese wurden in einem speziellen Vorratsraum und im Lednik (einer Vorratskammer im gefrorenen Boden) aufbewahrt, die wöchentlich überprüft werden mussten, da es keine anderen Möglichkeiten zur Kühlung gab.

Wenn es einmal Probleme mit der hochtechnischen Ausrüstung gab, lernten die Teilnehmer schnell zu improvisieren. In den meisten Fällen konnte AWI-Ingenieur Günter Stoof, auch „Hausmeister“ genannt, schnell mit einfachen und praktischen Lösungen aushelfen - der Arbeitsablauf der Expeditionen musste nur selten aufgrund technischer Probleme geändert werden.

Trotz der langen und mühsamen Arbeitstage vor Ort, die um 8:00 Uhr morgens begannen und frühestens um 18:00 Uhr endeten, nutzten die russischen und deutschen Teilnehmer jede Gelegenheit zum Austausch über ihre Arbeit und zukünftige Pläne. Und wenn die Teilnehmer nicht zu müde waren, fanden sie Gefallen am gemeinsamen abendlichen Singen mit „piwo und compott“ (Obstkompott mit ein wenig Alkohol - lecker, lecker). Dank dieser Stunden nannten die Wissenschaftler Samoillow ihre Trauminsel im Delta und so wurden aus Arbeitskollegen Freunde für immer!

In den ersten Jahren auf Samoillow konzentrierte sich die Erforschung der modernen Prozesse auf die Charakterisierung der Kohlenstoffeigenschaften in den Böden und ihren Funktionen für die Energie-, Wasser- und Spurengasflüsse. Die Klimastation zur Erhebung von Boden- und Wetterdaten auf Samoillow zeichnet seit fast 20 Jahren wichtige Wetter-, Boden- und Permafrostparameter auf. Die erste automatische Wetter- und Bodendauerbeobachtungsstation wurde während der Sommerexpedition 1998 eingerichtet. Die Sensoren und Detektoren dieser ersten bodennahen Station ermöglichten Messungen von Lufttemperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung, Niederschlag, Schneehöhe, Bodentemperatur, elektrischen Leitfähigkeit des Bodens, volumetrischem Bodewassergehalt und Wärmeflüssen im Boden (siehe Abbildung 1). Automatisierte Messungen sind eine Herausforderung für Klimasensoren und die Stromversorgung aufgrund der extremen klimatischen Bedingungen mit Tiefsttemperaturen der Luft von  $-45^{\circ}\text{C}$ , Windgeschwindigkeiten von bis zu 16 m/sec und anhaltender Dunkelheit im Winter. Diese arktischen Bedingungen können dazu führen, dass die technische Ausrüstung auf ungewohnte Weise ausfällt.



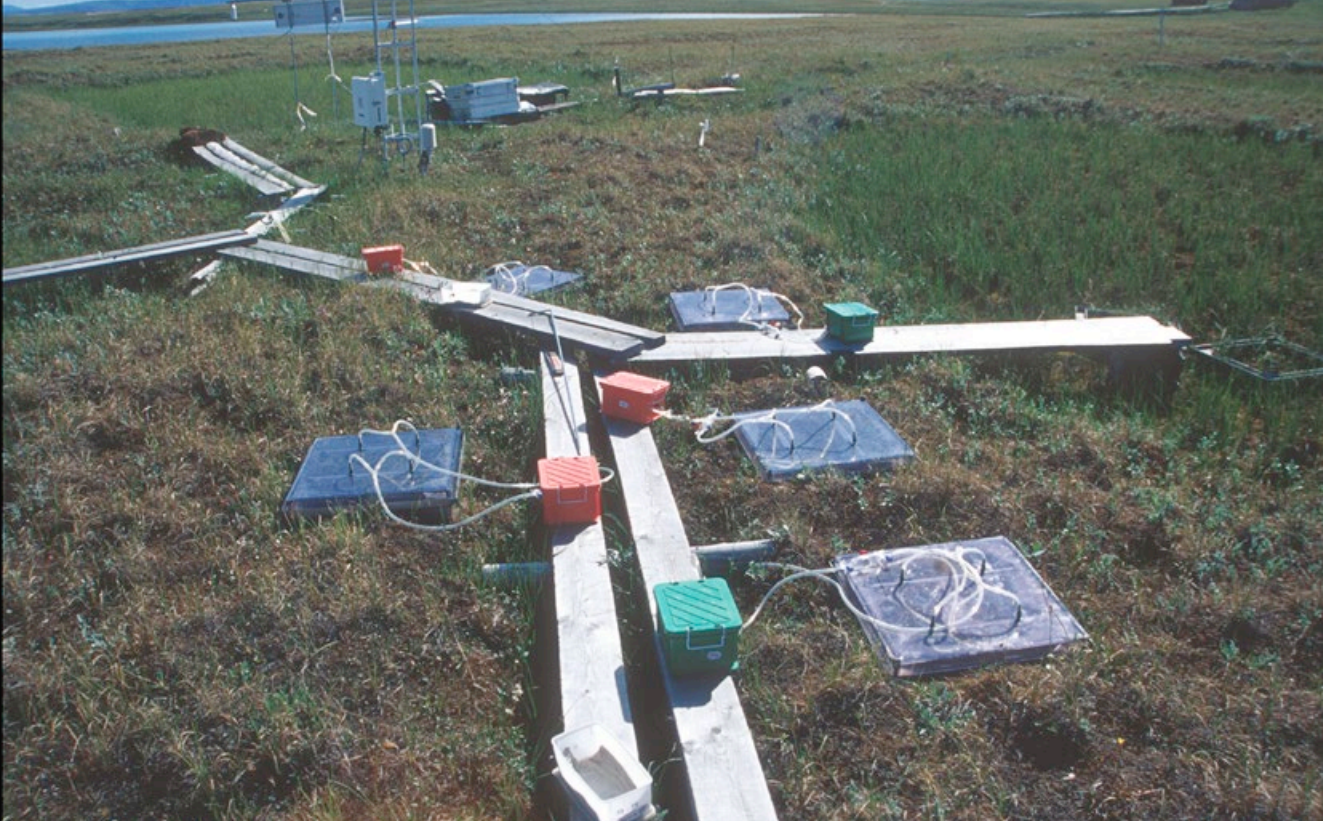
Die erste automatische Wetterstation wurde im Winter 1998/1999 erfolgreich in Kombination von Batterien und Solarpanel mit Strom versorgt (Abbildung 2) und ermöglicht seitdem eine gänzzjährige Klimadatenaufzeichnung.

Ursprünglich war nur eine Betriebsdauer von drei Jahren für die Station geplant. Man überprüfte sie jedoch 2001 und ersetzte sie schließlich im August 2002 durch eine neue Station. Letztere wurde bis zuletzt instandgehalten und liefert nun Langzeit-Datensätze. Die Daten werden vielfältig genutzt, (i.) um Reaktionen auf die Antriebe von Veränderungen des Ökosystems zu quantifizieren, (ii.) um komplexe Prozesse des Ökosystems zu verstehen, die sich über einen langen Zeitraum abspielen und (iii.) um Erdsystem- und Landbedeckungsmodelle zu parametrisieren und validieren.

Dieses Langzeitobservatorium auf Samoillow dient als Plattform für gemeinsame Studien, die multidisziplinäre Forschung fördern. Samoillow hat sich zu einem Referenzstandort für zahlreiche internationale Programme wie CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring Network), FLUXNET (Netzwerk zur Koordinierung regionaler und globaler Analysen von Beobachtungen durch mikrometeorologische Turmstandorte) und weitere entwickelt.

Abbildung 2: Die erste automatisierte Wetter- und Bodenbeobachtungsstation in der polygonalen Tundra auf der ersten Terrasse auf Samoillow, installiert im August 1998, lieferte erfolgreich die ersten Daten im Winter 1998-1999. (Foto: W. Müller-Lupp)



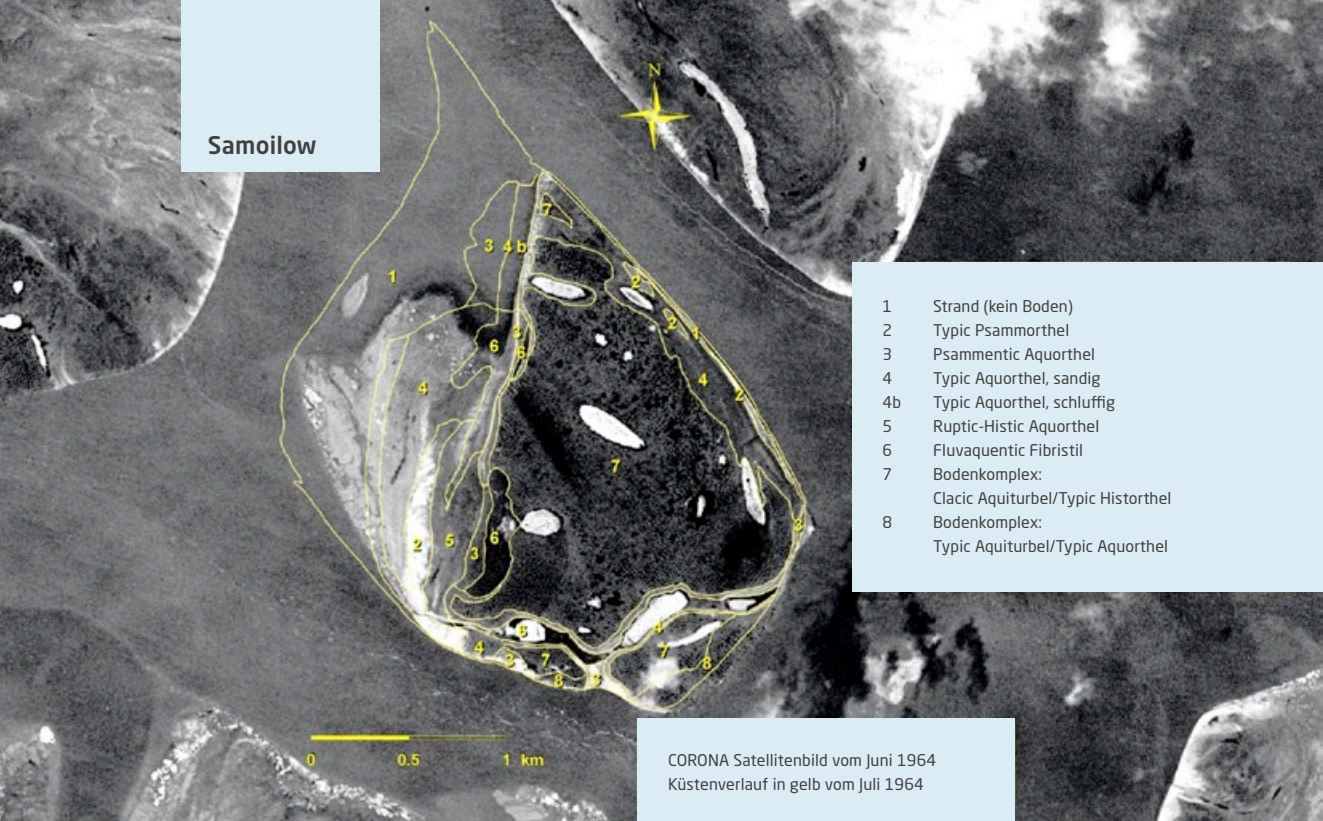


Die Untersuchungen zu Bodenkohlenstoffumsätzen und Spurengasflüssen auf Samoillow begann ebenfalls 1998. Daten, die zunächst mittels geschlossener Emissionskammern erhoben wurden, zeigten eine hohe Variabilität des freigesetzten Methans aus den feuchten polygonalen Tundraböden - mit niedrigen Emissionsraten von  $<10 \text{ mg CH}_4 \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-2}$  aus den Bereichen der trockeneren Polygonrändern und mit hohen Werten zwischen  $70\text{-}80 \text{ mg CH}_4 \text{ d}^{-1} \text{ m}^{-2}$  aus dem Bereich der nassen Polygonzentren. Die Variabilität der Methanflüsse in den Polygonen wird durch die Bodenwasserbedingungen (Mächtigkeit der oxischen und anoxischen Bodenzonen), die Substratverfügbarkeit für die  $\text{CH}_4$ -produzierenden Archaeen und die Aktivität der methanoxidierenden Bakterien in den aeroben Oberböden verursacht. Die ersten Vor-Ort-Untersuchungen zu den mikrobiellen Prozessen begannen im Jahr 2000 und konzentrierten sich auf die Methanbildung in Böden sowie die  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Eiskeilen an verschiedenen Standorten im Lenadelta.

Die ersten mikrobiellen Studien zum Stickstoffkreislauf im Permafrost begannen 1999 in unserem Feldlabor auf Samoillow. Sie basierten auf früheren Untersuchungen der russischen „Beringia“-Expedition. In Oberbodenproben konnte die Koexistenz von Nitrit-oxidierenden Bakterien *Nitrobacter* und *Nitrospria* mittels

Abbildung 3: Geschlossene Messkammersysteme für die Messung von Methanflüssen aus der feuchten polygonalen Tundra auf Samoillow im Jahr 2001 (Foto: E.-M. Pfeiffer)

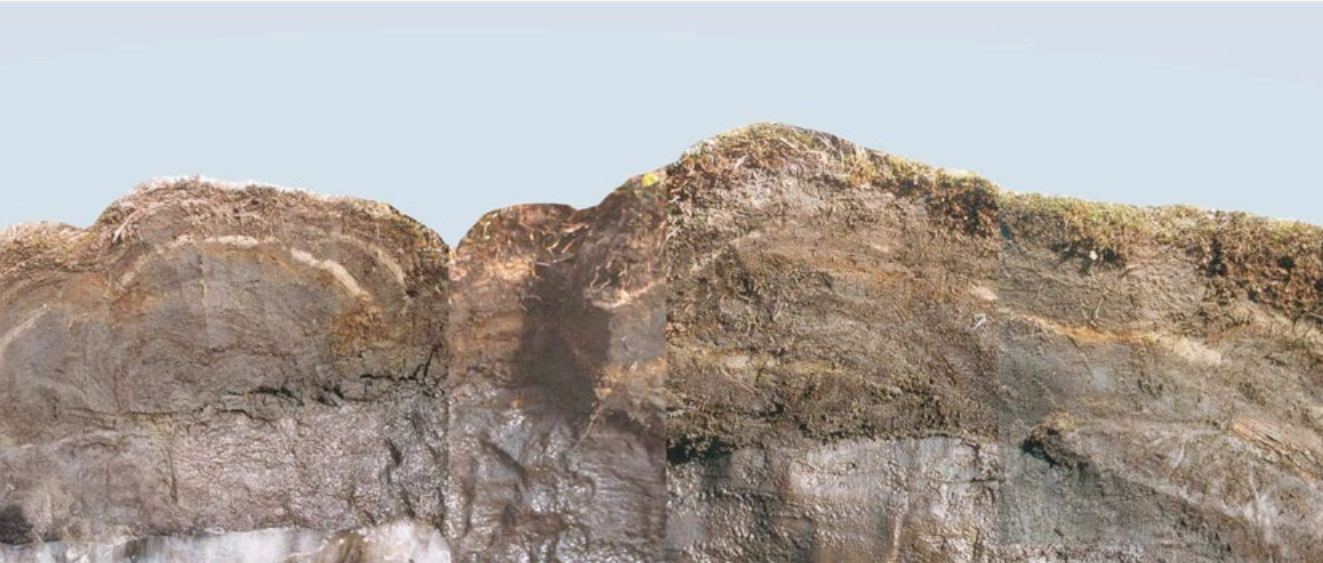
## Samoilow



Anreicherungskulturen aus Bodenmaterial von Rändern der polygonalen Tundra gezeigt werden. In der Auftauzone und tieferen Permafrostsedimenten, die etwa 40.000 Jahre alt sind, war die nitrifizierende Aktivität bei 28 °C höher als bei 17 °C, wohingegen die Bakterien in älteren Ablagerungen (0,6-3 Millionen Jahre) niedrigere Temperaturen von 17 °C bevorzugten. In Bodenproben, die 2001 aus der Auftauschicht eines vom Polygonrand bis zum -zentrum reichenden Transekts entnommen wurden, konnte eine neue chemolithoautotrophe Nitrit-oxidierende Bakterienart mit dem Namensvorschlag ‚*Candidatus Nitrotoga arctica*‘ bei niedrigen Temperaturen bis zu 17 °C angereichert werden.

Eine erste Bodenkarte von Samoilow (siehe Abbildung 4) konnte basierend auf den russischen und amerikanischen Systemen der Bodenklassifikation erstellt werden. Sie zeigt die Diversität der permafrostbeeinflussten Böden auf Samoilow. Die erste Terrasse oberhalb der Überschwemmungsgebiete im östlichen Teil Samoilows ist eher einheitlich mit dem Bodenkomplex aus *Glacic Aquiturbel* und *Typic Historthels* (nahezu 70 % der Inselfläche) bedeckt. Ein repräsentativer Bodenquerschnitt zeigt die Heterogenität der permafrostbeeinflussten Böden der Polygone mit tiefen Zentren auf Samoilow (Abbildung 5). Diese Heterogenität des Bodens erklärt die hohe Variabilität der Kohlenstoffumsatzraten und Spurengasflüsse.

Abbildung 4: Erste Bodenkarte von Samoilow, basierend auf einem CORONA-Satellitenbild von 1964, zeigt die Diversität permafrostbeeinflusster Böden. (Pfeiffer et al. 2001)



Um weitere Daten aus den Kohlenstoffspeichern in tiefer gelegenen Permafrostsedimenten zu erlangen, begannen erste Permafrostbohrungen auf den Inseln Samoilow, Kurungnach und Sardach während der Lena-Expedition im Jahr 2001.

Die bodenbezogene Forschung liefert grundlegende Datensätze für weitergehende Untersuchungen zur Energie- und Wasserbilanz, zur Kohlenstoffsенке (Menge, Festlegung, Umsatz) und zu Kohlenstoffquellen (C-Flüsse, Spurengasemission) in den arktischen, feuchten Tundra-Ökosystemen des Lenadeltas. Diese Langzeitstudien zum Klima, zu Böden und zur Ökologie sind erforderlich, um wichtige Erkenntnisse zu Veränderungen der Umwelt, des Klimas und der Biodiversität zu erlangen. Dies gilt besonders für arktische Regionen, in denen die Dichte von Beobachtungsstationen unterrepräsentiert ist und ganzjährige Messungen schwierig sind. Der Erhalt qualitativ hochwertiger Daten wird nur durch regelmäßige Wartung, Kalibrierung und Besuche dieser abgelegenen Standorte ermöglicht.

*Eva-Maria Pfeiffer, Julia Boike, Günter Stoof, Lars Kutzbach, Mikhail N. Grigoriev, Irina A. Yakshina, Anna N. Kurchatova, Dmitry Yu. Bolshiyarov*

Abbildung 5: Querschnitt eines Polygons mit niedrigem Zentrum, der die verschiedenen Gelsole und die Heterogenität kryoturbiert Böden zeigt. (Foto: L. Kutzbach)



## Bykowski-Halbinsel: Die erste Landexpedition mit Fokus auf das Paläoklima

Gemeinsame russisch-deutsche Expeditionen hatten seit 1993 Nordsibirien zum Ziel und brachten zahlreiche Wissenschaftler aus beiden Ländern zusammen. Der Zweck dieser Expedition waren Studien der derzeitigen und vergangenen Umweltbedingungen in der Arktis. 1998 begann das umfangreiche Forschungsprojekt „System Laptev Sea 2000“. Die Expedition „Lenadelta 1998“ fand im Rahmen dieses Projektes im Juli und August 1998 statt. Unsere Forschungsgruppe sollte die Spuren vergangener Landschaften sowie ökologische und klimatische Entwicklungen im sibirischen Permafrost untersuchen.

Permanent gefrorener Boden (Permafrost) existiert seit hunderttausenden von Jahren in Sibirien. Extreme Kälte im Winter sorgt dafür, dass der Boden im Sommer nicht vollständig auftauen kann. Die Permafrostschicht wird nach und nach dicker, während sich Sedimente ablagern. Diese Bedingungen lagen lange Zeit durchgehend vor und der Boden in Sibirien gefror bis zu einer Tiefe von mehreren hundert Metern. Die Überreste von Pflanzen und Tieren, die für die

Abbildung 1: Der Kuno genannte Thermokarsthügel, noch intakt an der Küste der Laptevsee.

Landschaft charakteristisch sind, gefroren ebenfalls und wurden so konserviert. Zusätzlich zu diesen „Bioindikatoren“ ist die Zusammensetzung von stabilen Sauerstoff- und Wasserstoffisotopen im Grundeis ein wichtiges Klimasignal. Während sich Sedimente ablagerten, bildeten sich auch Eiskeile darin. Diese entstehen durch das Gefrieren von atmosphärischen Niederschlägen in Form von dünnen Jahresschichten in Frostspalten. Die Spalten entstehen im Winter und reichen tief in den Permafrost hinein. Die Analyse der Isotopzusammensetzung in Eiskeilproben aus horizontalen Profilen ermöglicht die Rekonstruktion von Wintertemperaturen vergangener Epochen.

Im März 1998 begannen viele von uns mit unserer Arbeit an der Potsdamer Forschungsstelle des Alfred-Wegener-Instituts. Bis Ende März stecken wir bereits tief in den Expeditionsvorbereitungen. Im April kaufen wir die benötigte Ausrüstung und bis Mai hatten wir alles in Bremerhaven in Containern verpackt und nach Russland verschickt. Unsere russischen Partner in St. Petersburg setzten ihre Arbeit an der Organisation der Expedition fort. Im Juli saßen wir endlich in einem Flugzeug, das über die sibirische Tundra flog. Wir standen stundenlang an den Fenstern und sahen auf die einzigartigen Permafrostlandschaften hinab. Unsere jüngeren Expeditionsteilnehmer konnten es noch nicht fassen, dass ihr Leben als Forscher begonnen hatte. Dieses Staunen hat bei vielen Expeditionsteilnehmern bis heute nicht aufgehört.

Unser Expeditionsziel war die Küste der Bykowski-Halbinsel südöstlich des Lenadeltas. Unser wichtigstes Forschungsobjekt war ein berühmter kilometerlanger Aufschluss aus sehr eisreichem Permafrost, der „Eiskomplex“ an der Ostküste. Das ausgewählte Gebiet erinnerte uns ein wenig an die Osterinsel. Gefrorene Sedimentsäulen, mehrere Meter hoch, stachen oft zwischen den aufgetauten Eiskeilen hervor. Diese Säulen haben lange, schmale oder breite „Köpfe“, die uns an die Statuen auf der Osterinsel erinnerten. Eine der Säulen nannten wir „Kuno“, zu Ehren unseres erfahrenen Kollegen Viktor Kunitsky vom Permafrost Institute in Jakutsk. „Kuno“ war ein besonders prachtvolles Exemplar eines Thermokarsthügels, oder „Baydzhherakh“ auf Russisch. Er stand auf seinen schlanken Beinen fest im Schlamm und reckte stolz seinen Kopf in Richtung der arktischen Sonne. Dieser Hügel war für unsere Feldarbeit besonders geeignet, da hier fast 10 m ungestörter gefrorener Ablagerungen übereinander lagen. Spätere Untersuchungen ergaben, dass diese Ablagerungen eine Zeitspanne von 20.000 Jahren umfassten. Wir hackten und bohrten wahrscheinlich zu lange an „Kuno“



herum, weil er nach zwei Tagen den Kopf verlor. Es gab ein lautes Krachen und plötzlich war „Kuno“ kopflos. Glücklicherweise rollte sein einst stolzer Kopf in Richtung Meer, wo zu diesem Zeitpunkt niemand arbeitete.

Ende Juli war das Wetter zusehends unfreundlicher geworden - windig und regnerisch bei Temperaturen um die 8 °C. Da ging es bei Sturmböen und Regenschauern zur Eiswand mit ihren zähen Schlammlawinen. Unser Ziel war es, so viele Proben wie möglich zu nehmen, um die gesamte Sequenz der Ablagerungen und somit die jüngere Geschichte der Arktis zu untersuchen. Schnell sahen wir so aus, als hätten wir ein Schlammbad genommen, da wir trotz Kletterschuhen immer wieder in die Knie gehen mussten. Ob es nun regnete oder die Sonne schien, die steile Küste taute den ganzen Sommer lang auf. Aus diesem Grund brach ständig Material ab und rutschte den Hang hinunter. Man hörte es ständig klatschen und kleckern und immer wieder Grasbatzen aufs Eis fallen. Immer wenn sich genug Schlamm angesammelt hatte, rutschte eine Lawine in Richtung Strand hinunter und zog manchmal einen von uns mit sich. Die herausfordernden Bedingungen konnten die gute Stimmung in unserer Gruppe nicht trüben.

Abbildung 2: Aufstieg zum kopflosen Kuno und der Wand des Eiskomplexes.



Alle arbeiteten mit viel Begeisterung zusammen. Unsere Forschung auf der Bykowski-Halbinsel im Jahr 1998 war erst der Anfang. Im folgenden Jahr machten wir uns zur Großen Ljachow-Insel auf, 400 km weiter östlich. Wir kehrten in den Jahren darauf vier Mal dorthin zurück, um unsere Forschungsergebnisse zu ergänzen. Nachfolgende Expeditionen führten mehrere Male ins Lenadelta, zur Westküste der Laptewsee und weiter ostwärts an die Kolyma, immer mit dem Ziel, die Umweltgeschichte des späten Pleistozäns und Holozäns in all ihrer Vielfalt zu erforschen. Die Expeditionen der ersten Jahre hatten fast 30 von Experten überprüfte Publikationen in internationalen Fachjournalen zur Folge, sowie eine ganze Reihe an Diplom- und Doktorarbeiten. Eins ist sicher: Wenn man einmal die Forschung in der Arktis erlebt hat, ist es nicht so leicht, diese Erfahrung hinter sich zu lassen. Eine große Zahl an wissenschaftlichen Fragen bleiben noch offen. Diesen Fragen zusammen mit russischen Kollegen nachzugehen ist einzigartig.

*Lutz Schirrmeister, Guido Grosse, Viktor V. Kunitsky, Christine Siegert, Hanno Meyer*

Abbildung 3: Teil der Wand des Eiskomplexes mit Eiskeilen und Sedimenten.

## Schiffsexpeditionen von 1998 bis 2002 zur Untersuchung von Erosion und Geomorphologie der Küste mit Dunai, Neptun, Sofron Danilov und Pavel Bashmakov

Die Forschungsaktivitäten, die zur Untersuchung der ökologischen und klimatischen Geschichte des Lenadeltas, des Partikeltransports im Schelfsystem des Lenadeltas und der Quantifizierung von Küstenerosion und damit verbundenem Transport von Sedimenten und organischem Kohlenstoff zur Laptewsee durchgeführt wurden, umfassten auch ein umfangreiches Programm zur Probenahme. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Stationen, die auf fünf Expeditionen von 1998-2002 besucht, untersucht und beprobt wurden. Verschiedene Forschungsschiffe und andere Schiffarten wurden eingesetzt, um diese oft sehr abgelegenen Orte zu erreichen (Tabelle 1). Das Expeditionsteam nutzte die Schiffe als Basislager und setzte in kleineren Booten zur Küste über. Alle Schiffe wurden von der Tiksi Hydrobase gechartert.

Das kleine Küstenschiff „Dunai“ (Abbildung 2) wurde für die Arbeit im und um das Lenadelta eingesetzt (1998, 1999). 2000 und 2001 wurde ein ähnliches Schiff, die „Neptun“ (Abbildung 3) für hydrologische und geomorphologische Studien

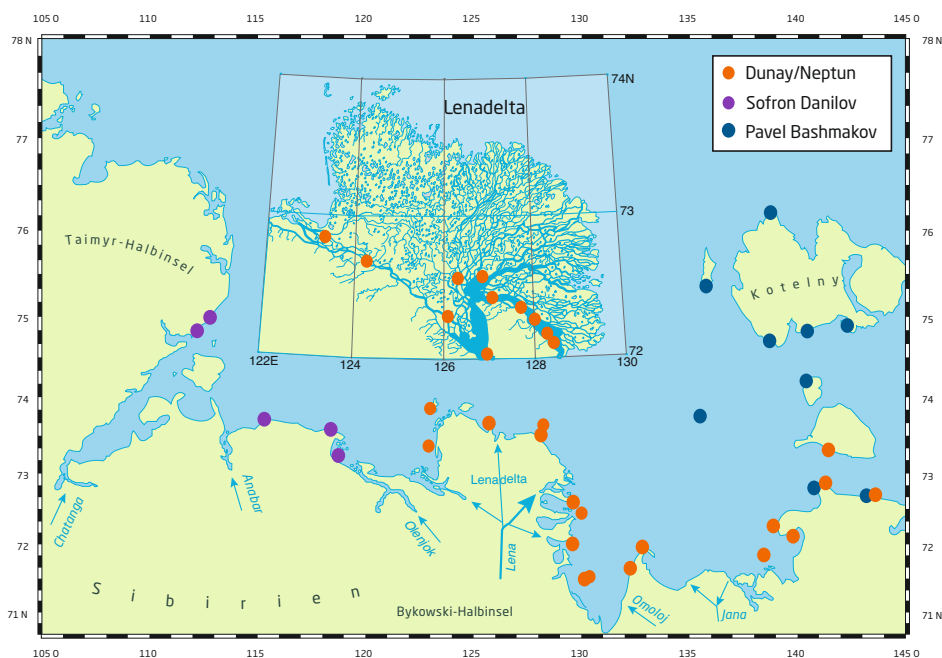


Abbildung 1: Besuchte Stationen während der Schiffsexpeditionen 1998-2002





Jahr	Schiff	Arbeitsgebiet	Feldstudien
1998	Dunai	Arme des Lenadeltas	Einrichtung von Strömungsmessern, CDT-Messungen (Leitfähigkeit, Tiefe, Temperatur), Sediment-Probennahmen (für Sedimentologie, Mineralogie, Geochemie und Optisch Stimulierte Lumineszenz)
1999	Dunai	Östliche und zentrale Front des Lenadeltas	Bathymetrische Messungen (ufernahe Profile), flachseismische Untersuchungen, Sediment-Probennahme (für Sedimentologie, Mineralogie und Geochemie)
2000	Sofron Danilov	Westliche Laptewsee	Bathymetrische Messungen (ufernahe Profile), flachseismische Untersuchungen, Sediment-Probennahme (für Sedimentologie, Mineralogie und Geochemie), Vermessung und Kartierung der Küstenlinie
2001	Dunai	Westrand des Lenadeltas und vorgelagerte Inseln	Bathymetrische Messungen (ufernahe Profile), flachseismische Untersuchungen, Sediment-Probennahme (für Sedimentologie, Mineralogie und Geochemie), Vermessung und Kartierung der Küstenlinie
2002	Pavel Bashmakov	Östliche Laptewsee und Neusibirische Inseln	Bathymetrische Messungen (ufernahe Profile), flachseismische Untersuchungen, Sediment-Probennahme (für Sedimentologie, Mineralogie und Geochemie), Vermessung und Kartierung der Küstenlinie

Abbildung 2: Küstenschiff „Dunai“.

Tabelle 1: Überblick über die Schiffsexpeditionen für Studien der Küste und Geomorphologie.



im Lenadelta eingesetzt. Diese kleinen Schiffe wurden auch genutzt, um einige Expeditionsteams zu ihren jeweiligen Forschungsstandorten zu bringen. In anderen Jahren wurden größere Schiffe genutzt, um entlegene Stationen entlang der Küste der Laptewsee zu erreichen. Im Jahr 2000 wurde der Schlepper „Sofron Danilov“ (Abbildung 4) genutzt, um einige Stationen an der Küste der westlichen Laptewsee zu untersuchen und beproben. 2002 wurde das Forschungsschiff „Pavel Bashmakov“ (Abbildung 5) gechartert, um die östliche Laptewsee sowie die Neusibirische Insel zu besuchen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Arbeitsabläufe der fünf Expeditionen, inklusive der Arbeitsgebiete und Feldstudien.

Zusätzlich zu ihrer Funktion als Basislager für die mit der Küstenforschung beschäftigte Arbeitsgruppe wurden die Schiffe auch als Koordinationszentren für die gesamte Expedition sowie für logistische Zwecke genutzt. Die anderen Expeditionsteams, die zum selben Zeitpunkt an anderen Standorten in den Gebieten des Lenadeltas oder der Laptewsee arbeiteten, konnten mittels Satellitentelefonen kontaktiert werden. Weitere Teams wurden überdies oft mit den Schiffen zu ihren Arbeitsgebieten transportiert.

*Volker Rachold, Waldemar Schneider, Mikhail N. Grigoriev, Hans-Wolfgang Hubberten, Felix E. Are, Dmitry Yu. Bolshiyarov*

Abbildung 3: Binnenschiff „Neptun“. Abbildung 4: Schlepper „Sofron Danilov“. Abbildung 5: Forschungsschiff „Pavel Bashmakov“.



## Untersuchung von Seen auf Arga: Geschichte und Entstehung des Lenadeltas

Ein modernes Flussdelta bildet seit dem frühen Holozän den östlichen Bereich des Lenadeltas. Im Kontrast dazu ist der nordwestliche Teil des Lenadeltas – auch bekannt als die Arga-Muora-Sise-Insel – geprägt von zahlreichen unverbundenen Seen und dem Fehlen größerer Flussarme. Die Seen sind mehrere hundert Meter breit und lang. In ihrer Mitte finden sich ungewöhnlich tiefe Mulden, umgeben von sehr flachen, sandigen Schelfen. Was ist der Ursprung dieser auffälligen Seenmorphologie und warum sind viele dieser Seen so länglich und haben eine so ausgeprägte Orientierung?

Mit dieser Frage im Hinterkopf hatten wir uns entschieden, im Winter und Sommer Feldstudien auf Arga durchzuführen. 1998 und 1999 kombinierten wir geophysikalische Messungen mit flachen Sedimentbohrungen, um dem Ursprung dieser außergewöhnlichen Seenlandschaften auf den Grund zu gehen. Ein numerisches Modell vervollständigte unsere Interpretation.

Wir konzentrierten uns auf die Bestimmung des Alters und der Genese des Nikolajsees, des größten und markantesten der Arga-Seen. Wir haben angenommen, dass er repräsentative Hinweise auf die Geschichte von Arga liefern würde. Ein Ziel dieser Studie war es, die wissenschaftliche Kontroverse, ob der Ursprung dieser Seen glazial oder periglazial ist, aufzulösen. Mit anderen Worten, wir wollten Licht in das Dunkel um die Geschichte Argas während des späten Quartärs bringen.

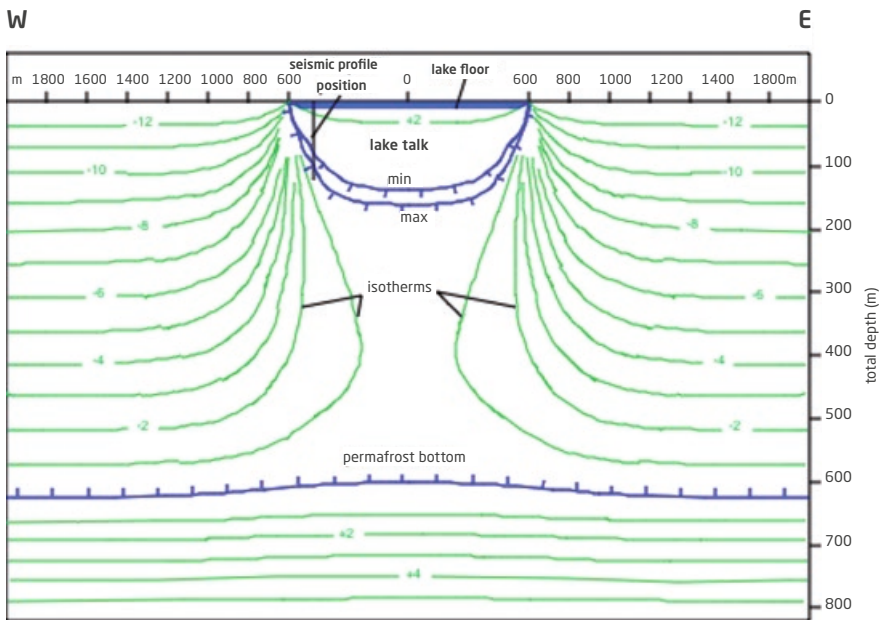
Abbildung 1: Die Argaseen (RapidEye\_2010-07-06) liegen in einer sandigen Ebene und haben breite, flache Schelfabschnitte (<2 m Wassertiefe) und tiefe Zentralbecken. Der Nikolajsee (teilweise von Eis bedeckt) hat mehrere Becken (maximal 17 m Wassertiefe) und ist in seiner größten Ausdehnung je 8 km lang und breit.



Flachseismische Profile durch das Becken, ergänzende Bodenradarprofile der gefrorenen, flachen Randzonen, und eine Reihe von Sedimentkernen aus einem der tiefen, zentralen Becken des Nikolajsees lieferten Beweise für die Entwicklung des Sees seit dem frühen Holozän. Die obersten Meter der zweiten sandigen Terrasse des Lenadeltas, auf der sich der Nikolajsee befindet, haben sich am Ende des späten Pleistozäns gebildet (14.500 bis 10.900 Jahre BP) und sind repräsentativ für die Umwelt vor der Entstehung der Seen. Die Sedimenteigenschaften deuten auf eine fluviale Umgebung mit Sedimenten eines Flussbetts hin. Nach einem anfänglichem Stadium als Sumpfgebiet wurde ein Seenbecken durch eine Thermokarstabsenkung in der sandigen Umgebung um 7000 Jahre BP gebildet. Basierend auf Pollenanalysen setzte der umfangreiche Thermokarst zeitgleich mit dem regionalen holozänen Klimaoptimum ein.

Seismische Profile ließen erkennen, dass mächtige Zonen ungefrorener Ablagerungen („Taliks“ genannt) unter den tiefen, zentralen Seenbecken existieren und von Permafrost umgeben sind. Ein mathematisches Modell des Wachstums und der Ausdehnung des Taliks unterhalb der Seen bestätigte diese Interpretation. Basierend auf unseren Erkenntnissen bestätigen weder geologische noch geophysikalische Ergebnisse die Hypothese, dass die Morphologie des Gebiets einen glazialen Ursprung hat. Dies wurde von Fernerkundungsmethoden anderer Autoren abgeleitet. Stattdessen hinterließ eine allmähliche Migration der Flussarme von West nach Ost eine sandige Ebene, in der sich vom Fluss abgeschnittene Tümpel zu Thermokarstbecken entwickelten. Thermokarstseen schlossen sich manchmal zusammen und so entstand die Morphologie von Zwillingseen wie im Falle des großen Nikolajsees.

Abbildung 2: Das Bodenradar des Wintereises bildet die Bathymetrie und Sedimentgeometrie in den Seen ab.  
Abbildung 3: Sedimentkernbohrungen halfen bei der Verifizierung geophysischer Reflektoren aus dem Untergrund und lieferten das nötige Material für die Rekonstruktion vergangener Umweltstadien in der Region.



Die Forschung auf Arga wurde 2001, 2005 und 2009 in Form weiterer Bohrungen und Aufschlussuntersuchungen fortgesetzt. Die Forschungsergebnisse aller Studien wurden in zahlreiche Doktor- und Masterarbeiten integriert.

Es sollte vielleicht noch erwähnt werden, dass sich Nachwuchsforscher wie Doktoranden zu Anfang unserer Forschung im Lenadelta in der Spitze einer auf dem Kopf stehenden Pyramide befanden. Es waren viele leitende Wissenschaftler vor Ort und man hatte miteinander stets gut lachen. Mittlerweile haben sich die Dinge geändert und es befinden sich viele Nachwuchswissenschaftler inklusive studentischer Assistenten im breiten Sockel einer aufrecht stehenden Pyramide des Feldpersonals. Heutzutage gibt es nur wenige leitende Wissenschaftler in der Spitze der Pyramide in der Feldforschung. Dies könnte ein Zeichen des fortschreitenden Wissens um die Region sowie der Fähigkeiten sein, die für die Vorbereitung und Durchführung von Feldforschung erforderlich sind. Es kann auch den Vorsprung junger Wissenschaftler in technischen Fähigkeiten, aber auch eine verbesserte, automatisierte Routine zeigen.

*Georg Schwamborn, Mikhail N. Grigoriev, Volker Rachold, Vladimir E. Tumskoy, Lutz Schirrmeister, Guido Grosse*

Abbildung 4: Numerische Modellierung untermauert die Interpretation einer tiefen Tausee-Ausdehnung (Thermokarst) im sandigen Terrain, welches ein Überbleibsel eines früheren fluvialen Stadiums des Flusses Lena ist.

## Mikrobieller Kohlenstoffumsatz in der Auftauschicht und im Permafrost

### Einleitung

Noch vor wenigen Jahrzehnten galt Permafrost als ‚steril‘ und die Mobilisierung von Kohlenstoff aus dem Permafrost und damit verbundene klimatische Rückkopplungen als unbedenklich. Inzwischen hat sich die Situation umgekehrt. Das Lenadelta ist seit 1998 der Mittelpunkt zahlreicher Studien zum mikrobiellen Kohlenstoffumsatz. Die Produktion und Aufnahme des starken Treibhausgases Methan sind dabei von besonderem Interesse. Die im Lenadelta durchgeführten mikrobiologischen Studien entdeckten eine große Anzahl an Methan verbrauchenden und Methan bildenden Mikroorganismen. Man fand heraus, dass die Aktivität der Organismen sich in einer Temperaturspanne von teilweise mehr als 30 °C oberhalb und unterhalb des Gefrierpunktes abspielt. Diese Mikroorganismen sind also sehr gut an die rauen Bedingungen von entweder regelmäßigem oder permanentem Gefrieren angepasst. Die Aktivität und Anzahl der Mikroorganismen, die in den permafrostbeeinflussten Böden im Lenadelta vorkommen, sind generell denen in weniger extremen Regionen sehr ähnlich. Mikrobengemeinschaften in tiefen, permanent gefrorenen Sedimenten sind auch ein Abdruck vergangener ökologischer Veränderungen und zeigen die Randbedingungen für zukünftige Reaktionen auf Permafrostauftau auf. Die vielfältigen Bedingungen des für die polygonale Tundra der Arktis typischen Mikroreliefs, der Hydrologie und der Vegetation weisen mehrere Faktoren auf, die den Methanverbrauch und -bildung von Mikroorganismen beeinflussen. Beispielsweise versorgen Gefäßpflanzen wie *Carex* sp. aber auch Moose die Mikroorganismen mit Nahrung und Sauerstoff, wohingegen stehende Gewässer der polygonalen Tundra die Bildung von Torf sowie den Kohlenstoffumsatz bei fehlendem Sauerstoff begünstigen. Feldforschung in der abgelegenen, nördlichen Tundra bedeutet wenig Schlaf, viel Arbeit, unerbittliche Moskitoattacken und das Ziehen von schwerem Gerät und Proben durch matschiges Gelände. Die Entschädigung für diese Anstrengungen: Unvergessliche Momente mit geschätzten Kollegen. Die folgenden Anekdoten geben Einblicke in zwei maßstabsetzende Aktivitäten für die mikrobiellen Ökologie im sibirischen Lenadelta.

### Ein methanogener Mikroorganismus reist von Samoilow ins All

Die Feldforschung im Sommer 2002 (Abbildung 1 links) leitete die ungewöhnliche Karriere einer „Mikrobe“ mit außergewöhnlichen Fähigkeiten ein. Die neue methanogene Kultur *Methanosarcina soligelidi* wurde 2013 endlich veröffentlicht - 11 Jahre nachdem die ersten methanbildenden Proben an der nördlichen

Spitze der Insel Samoilow entnommen worden waren. Nun gilt *M. soligelidi* als ein Modellorganismus für potenzielles Leben auf dem Mars. Langfristige Aussetzung gegenüber einem regelmäßigen Frost-Tau-Zyklus sorgte dafür, dass dieser methanogene Organismus aus der Auftauschicht sich zu einem äußerst belastungstoleranten Mikroorganismus weiterentwickelte. Er ist resistent gegen Austrocknung und kann extrem hohe Strahlungs- und Salinitätswerte überleben. Aufgrund seiner speziellen Eigenschaften wurde *M. soligelidi* ein Passagier auf der Außenplattform „EXPOSE-R2“. Diese Plattform war am russischen Swesda-Modul der Internationalen Raumstation ISS (Abbildung 1 Mitte und rechts) angebracht und 18 Monate lang marsähnlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (95 %) und Strahlung ausgesetzt.



### **Methan verbrauchende Bakterien in Moosen: Ein Beispiel improvisierter Forschung**

Die Arbeit an abgelegenen Orten erfordert immer Flexibilität, vor allem wenn sich Dinge nicht wie geplant entwickeln.

Genau das ist im Juli 2009 passiert, als die benötigte Ausrüstung an verschiedenen unbekanntem russischen Flughäfen feststeckte und ein wissenschaftlicher Mitarbeiter aufgrund von Problemen mit seinem Visum festsaß.

Da weitere Kollegen ebenfalls nicht mit den Feldmessungen beginnen konnten, machten wir zusammen viele lange Spaziergänge über die Insel. Diese brachten viele neue Ideen für gemeinsame Feldforschung hervor, hauptsächlich basierend auf der Ausrüstung, die in der Station verfügbar war. Wir nutzten die freie Zeit, um neue Hypothesen zu entwickeln und neue Experimente, Feldmessungen und Probenahmen zu planen, um diese neuen Hypothesen zu bestätigen.

Die Ergebnisse der improvisierten Feldforschung zeigten zum ersten Mal eine enge Wechselwirkung zwischen typischen Moosen der arktischen polygonalen Tundra (*Scorpidium scorpioides*, *Meesia triquetra*) und Methan verbrauchenden

Abbildung 1: Bodenbeprobung auf Samoilow (Foto: Günther Stoof), die ISS und „EXPOSE-R2“ Expositionsplattform auf dem russischen Swesda-Modul der ISS. (Quelle: DLR)

Bakterien, die unterhalb der Wasserschicht der zahlreichen Tümpeln auf Samoillow leben (Abbildung 2).

Methan verbrauchende Bakterien konnten den von den Moosen mittels Photosynthese erzeugten Sauerstoff nutzen, um fast das gesamte Methan zu oxidieren, das im sauerstofffreien, Tümpeluntergrund gebildet wurde.

Obwohl der anoxische Tümpelboden mit  $\text{CH}_4$  gesättigt war, konnten die Tümpel folglich sogar als Senken für atmosphärisches Methan fungieren. Eine solche Funktion konnte bisher nicht für wassergesättigte Böden gezeigt werden. Der Verbrauch von Methan durch diese Interaktion zwischen Pflanzen und Mikroben ist für einen großen Teil des in Moosen gebundenen Kohlenstoffs verantwortlich.

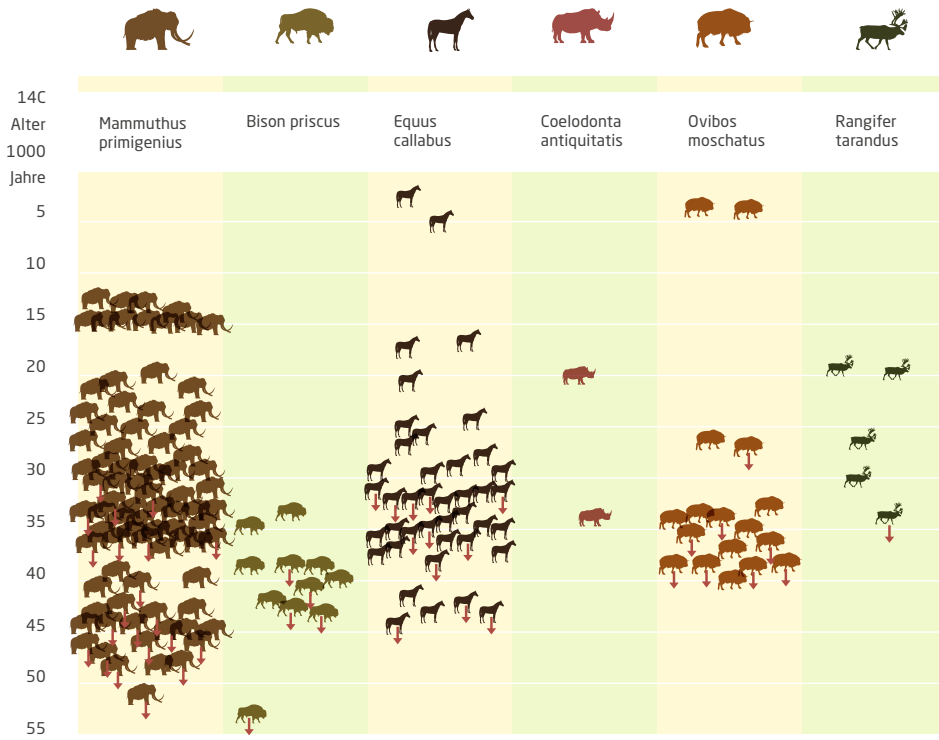


Die umfassende Erforschung des mikrobiellen Umsatzes von organischer Substanz in den Permafrostlandschaften des Lenadeltas und dessen Regulierung durch Umweltparameter und biologische Wechselwirkung spielt eine wichtige Rolle für die wegweisende Arbeit auf dem Gebiet der mikrobiellen Ökologie in Permafrostgebieten. Gleich von Anfang an führte diese Arbeit Wissenschaftler aus Russland (Krasnojarsk), Deutschland (Hamburg, Potsdam, Köln, München) und der Schweiz (Zürich) zusammen. Sie hat wesentlich dazu beigetragen, die Treibhausgasproduktion und den -umsatz im sibirischen Permafrost in einem sich ändernden Klima besser zu verstehen.

*Susanne Liebner, Christian Knoblauch, Eva-Maria Pfeiffer, Svetlana Yu. Evgrafova, Dirk Wagner*

Abbildung 2: Probennahme von Braunmoosen auf Samoillow (links) und ein Unterwasserbild des Braunmooses *Scorpidium scorpioides* (rechts). Diese Moose leben in Symbiose mit Methan oxidierenden Bakterien, indem sie Sauerstoff bereitstellen und im Gegenzug  $\text{CO}_2$  erhalten.





## Feldarbeit für die Rekonstruktion der Paläoumwelt

Pflanzenreste sind wichtige Zeugen wärmerer Sommer im späten Pleistozän mit einer üppigeren Pflanzendecke der sibirischen Tundrasteppes. Ebenso wichtig sind die Überreste zahlreicher großer Säugetiere der Mammutfauna. Neben Wollhaarmammuts (*Mammuthus primigenius*) wurden auch Pferde (*Equus caballus*), Wollnashörner (*Coelodonta antiquitatis*), Rentiere (*Rangifer tarandus*), Antilopen (*Saiga tatarica*), Steppenbisons (*Bison priscus*), Moschusochsen (*Ovibos moschatus*) und Hasen (*Lepus*) gefunden. Diese Pflanzenfresser unterscheiden sich stark in ihrer Größe. Zusammengenommen müssen sie beträchtliche Mengen an Nahrung aufgenommen haben. Unsere Untersuchungen wiesen die zeitgleiche Anwesenheit von Räubern wie Löwen (*Panthera leo spelea*), Wölfen (*Canis lupus*) und Füchsen (*Vulpes vulpes*) nach, was wiederum auf eine große Anzahl an Beutetieren schließen lässt. Aus der Anwesenheit dieser Tiere kann man folgern, dass, während sie in diesem Gebiet lebten, die Sommer warm und trocken waren. Da es diese Tierwelt hier nicht mehr gibt, müssen sich einige entscheidende

Figure 1: Radiokarbondatierung fossiler Überreste der Hauptvertreter der Mammutfauna, gesammelt während der gemeinsamen deutsch-russischen Expedition auf der Bykowski-Halbinsel im Jahr 1998. Nach unten gerichtete Pfeile zeigen das Mindestalter an.



Faktoren geändert haben. Heutzutage lebt eine artenärmere Säugetiergemeinschaft hier, die von kleinen und mittelgroßen Tieren wie Rentieren, Kaninchen, Lemmings, Wölfen und Füchsen dominiert wird. Eisbären siedeln hin und wieder vom Packeis zu den Inseln der Laptewsee über.

Zahlreiche Knochen- und Stoßzahnfunde sind Beweise für die vielfältige Fauna, die es hier einmal gab. Während der Auftausaison tauchen diese Funde an Küsten und Flüssen ständig aus dem Boden auf und umfassen manchmal Überreste von Haut und Fell. Die allerersten Reisenden in dieser polaren Gegend berichteten von beeindruckenden Funden: Sie schätzten vor allem das Elfenbein der Mammutstoßzähne. Auch heute noch sind diese Schätze - von Handwerkern und Sammlern sehr begehrt - eine lukrative Einkommensquelle für die modernen jakutischen und russischen „Elfenbeinjäger“ im rauen Norden. Unsere Säugetierspezialistin, die Paläontologin Tatyana Kuznetsova aus Moskau, identifizierte und katalogisierte allein während unserer Expedition zum Archipel der Neusibirischen Inseln 2002 mehrere hundert individuelle Funde, von einer Pferderippe bis zum Schulterblatt eines Mammut.

Von 1998 bis 2007 untersuchten unsere russischen Kollegen aus Moskau zahlreiche Funde von Mammutknochen, die im Permafrost erhalten worden waren.

Figure 2: Tatyana Kuznetsova reinigt die erste Sammlung von Mammutknochen (Bykowski, 1998).



Auf der Bykowski-Halbinsel geht die Häufung des Mammutnamens bei den geographischen Bezeichnungen auf die zahlreichen Funde von Mammutknochen zurück. Ein vollständiges Mammutskelett wurde auf der Halbinsel bereits 1799 geborgen und 1806 vom russischen Botaniker Mikhael Adams untersucht. Es befindet sich heutzutage im Zoologischen Museum in St. Petersburg. Bereits 1998 wurde eine umfassende Knochensammlung angelegt und die ersten Führungen organisiert. Knochen zweier verschiedener Mammutspezies wurden gefunden, sowie viele Knochen von Pferden, Rentieren, Antilopen, Büffeln, Löwen und Hasen.

Figure 3: Igor Syromyatnikov mit dem Oberschenkelknochen eines Mammut (Bykowski-Halbinsel, 1998).



Die Aufbereitung der Knochensammlungen war ein wichtiges Ereignis am Ende jeder Expedition. Natürlich konnten nicht alle Funde nach Moskau gebracht werden. Größere Knochenfunde waren erforderlich, um das Alter der Tiere zu bestimmen, die einst über die Tundrasteppes getrottet waren - beispielsweise vom Schulterblatt, Oberschenkel, oder Becken. Viktor Kunitsky demonstrierte freundlicherweise die Kunst des Knochenschneidens mit Kettensäge: Man ziehe Schutzbrille und -handschuhe an, platziere den Knochen auf einem Holzblock, und schneide ihn. Alle Expeditionsmitglieder standen im Kreis und nahmen aktiv an dieser paläontologischen Abschlusszeremonie teil.

2002 war Kap Anisii, das nördliche Ende der Kotelny-Insel, der nördlichste Punkt unserer Schiffsexpedition entlang der Neusibirischen Inseln. Hier lag unser nördlichster Knochenfund. Ein mächtiger Oberschenkelknochen eines Mammuts ragte unweit eines Thermokarsthügels vertikal aus dem Boden heraus. Der untere Teil dieses Knochens war noch gefroren, während am oberen Teil Nagespuren sichtbar waren, wahrscheinlich Spuren hungriger Polarfüchse. Es gab noch mehr vereinzelte Knochen in der Gegend. Diese Mammutknochen zeigen auf, dass Herden während der Eiszeit bis zu 76° nördlicher Breite vordrangen - und Nahrung fanden.

Ein paar Tage später arbeiteten wir an einem Küstenstreifen namens Oyogossky Yar nahe der Mündung des Flusses Kondratjewa. Russische Forscher hatten viele Jahre zuvor hier gearbeitet und von exzellenten Aufschlüssen berichtet. Der jakutische Name Oyogossky Yar bedeutet etwa „Steilufer, am dem das Fohlen gegessen wurde“, offenbar in Erinnerung an ein historisches Notfall-Grillen. Ein steiles Ufer erstreckt sich mehrere Kilometer entlang der Dmitri-Laptew-Straße. Das Steilufer ist an einigen Stellen vierzig Meter hoch und scheint fast ausschließlich aus Eis zu bestehen. Es wurde deutlich, warum frühe sibirische Polarforscher im 19. Jahrhundert, noch von den ersten Hypothesen der großen Eiszeiten und kontinentalen Vereisungen in Nord- und Mitteleuropa geleitet, dachten, sie würden bedeckte Gletscher in diesen Wänden sehen. Es stellte sich allerdings heraus, dass dies keine glazialen Überreste waren sondern gigantische Eiskeile, mehrere Dutzend Meter lang und bis zu sechs Meter breit. Schwarze, braune und graue Klumpen gefrorenen Bodens ragten aus der Eiswand hervor, die im Sonnenlicht glänzte und von Schmelzwasserströmen zerfurcht war. Wir sahen einen hervorstehenden Säugetierknochen, freigelegt durch die Sommerhitze. Das Gelände direkt vor der Eiswand war matschig und unwegsam, aber fos-



sile Schätze erwarteten uns hier und ein paar Meter weiter den Strand entlang. Alle arbeiteten gemeinsam daran, 369 individuelle Knochen, von einem kleinen Pferdehahn bis zum Schulterblatt eines Mammuts, zur Anlandestelle zu tragen. Tausende Fossilien der Mammutfauna aus dem Pleistozän wurden zwischen 1998 und 2007 im Gebiet der Laptewsee gesammelt. Die Ergebnisse wurden in zahlreichen Publikationen, inklusive dutzenden internationalen Publikationen, sowie einigen Abschlussarbeiten präsentiert, die Berichte von Untersuchungen der Sporen, Pollen, Pflanzenmakrofossilien, Muschelkrebse, schalentragenden Amöben, Diatomeen, Zuckmückenlarven, fossilen Käfer und Wasserflöhen unter dem Mikroskop lieferten.

*Lutz Schirrmeister, Tatyana V. Kuznetsova, Andrei A. Andreev, Frank Kienast, Dmitry Yu. Bolshiyarov*

Figure 4: Tatyana Kuznetsova mit einem gefrorenen Mammutstoßzahn (Oyogossky Yar, 2007).

Die Forschungsstation Insel Samoillow mit Blick auf das Hauptgebäude links und das neue Nebengebäude rechts. Im Sommer nutzen Expeditionsteilnehmer Zelte. (Foto: G. Stoof)





# 3.

Prozessstudien zur  
Permafrostdynamik  
2002-2006



## Submarine Permafrostbohrungen während der COAST 2005 Expedition

Als Folge ihrer Exposition während des Maximums der letzten großen Vereisung, so vermutet man, sind große Abschnitte der arktischen Schelfe fast vollständig von submarinem Permafrost unterlagert, der sich von der Küstenlinie bis in 100 Meter Wassertiefe erstreckt. Dieser submarine Permafrost ist dafür bekannt, Gashydrate zu enthalten, Verbindungen im festen Aggregatzustand, die bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck gebildet wurden und eine Mischung aus Eis und Gasen enthalten. Große Mengen an Methan können innerhalb oder unter dem submarinen Permafrost in Form von Gashydraten gespeichert werden. Der vorhandene Permafrost erhält die Stabilität dieser Gashydratzone. Durch die Degradation von Permafrost und die daraus resultierende Destabilisierung der Gashydrate kann sich der Methanfluss, einem starken Treibhausgas, in die Atmosphäre entscheidend, womöglich sogar dramatisch, erhöhen.

Im April 2005 fand das Küsten- und Offshore-Bohrprogramm COAST in der westlichen Laptevsee statt. Hauptziele waren es, den Übergang von Onshore- zu Offshore-Permafrost sowie den Einfluss von Salzwasser auf die Entwicklung von submarinem Permafrost nach dessen Überflutung zu verstehen. Das Küstengebiet kann als natürliches Labor genutzt werden, da aufgrund der Küstenerosion

Abbildung 1: Feldlager der COAST 2005 Expedition auf dem Meereis in der westlichen Laptevsee.





Landpermafrost sich durchgehend in submarinen Permafrost umwandelt. Die Zeit seit der Überflutung hängt von der Distanz zur heutigen Küstenlinie ab. Dieser Zeitraum kann mit bekannten Küstenerosionsraten berechnet werden.

Abbildung 1 zeigt das Feldlager auf Meereis. Zwei mobile Unterkünfte, Laborcontainer und das Bohrgerät wurden von Tiksi mit von Raupenfahrzeugen gezogenen Schlitten über das Meereis transportiert. Das Expeditionsteam kam per Helikopter an. Diese abgelegene Region wurde trotz der komplexen und teuren logistischen Anforderungen gewählt, weil warmes, weniger salzhaltiges Flusswasser in diesem Teil der Laptevsee einen geringen Einfluss hat. Außerdem war der Onshore-Abschnitt dieser Küstenregion bereits intensiv erforscht worden. Man wusste, dass es sich bei den Sedimenten generell um eisreiche Permafrostablagerungen des sibirischen Eiskomplexes handelte und Modellberechnungen legten nahe, dass durchgehender, eishaltiger Permafrost mit einer Dicke von 400-600 Metern in der ufernahen Zone der Küste zu erwarten war.

Entlang eines senkrecht zur Küstenlinie verlaufenden Transekts wurden fünf Bohrkernentnommen. Der Transekt erstreckte sich von der Küste bis 12 km ins Meer, wo die Wassertiefe 6 m erreichte. Eine Trockenbohrtechnik mit Verrohrung verhinderte das Eindringen von Salzwasser. Die Felduntersuchungen umfassten geokryologische Beschreibungen der Bohrkernentnommen, Messung von Bohrlochtemperaturen, und die Bestimmung des Salzgehaltes in Porenwasser und -eis.

Abbildung 2: Bohrkernprobe mit eisreichem, submarinem Permafrost.



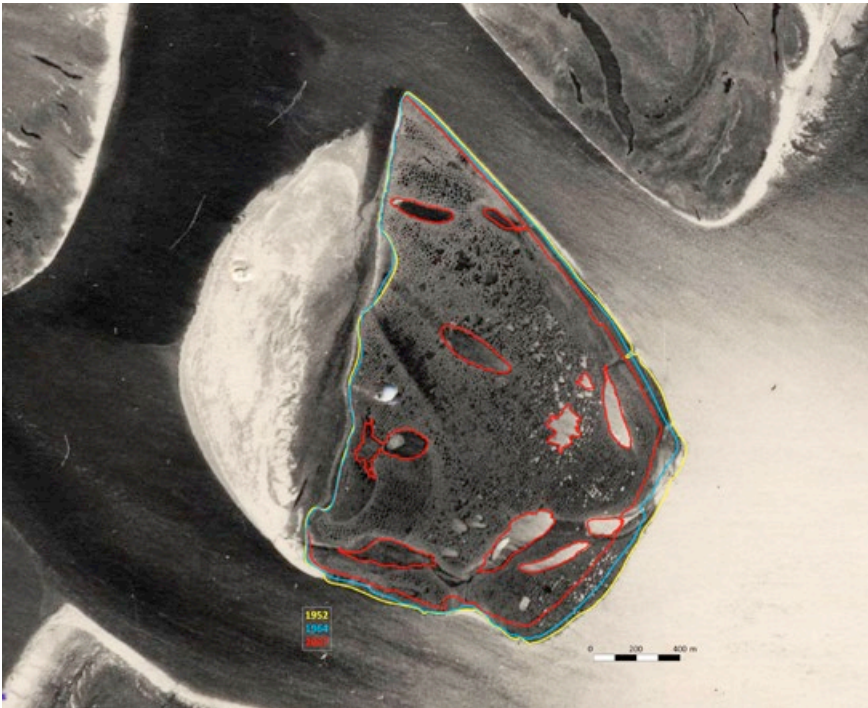
Abbildung 2 zeigt eine Bohrkernprobe bestehend aus eisreichen, submarinen Permafrostablagerungen, Abbildung 3 die Bohrarbeiten und Abbildung 4 die Porenwasserpresse, mit der Porenwasser und -eis getrennt wurden. Weitere Laboranalysen umfassten die Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenkonzentration des Poreneises sowie Infrarotoptisch stimulierte Lumineszenzdatierung (IR-OSL) der Sedimente aus dem tiefsten Bohrkern.

Noch 2005 wusste man wenig über submarinen Permafrost, hauptsächlich aufgrund fehlender direkter Beobachtung. Die Ergebnisse der COAST Expedition lieferten wertvolle aber auch überraschende Erkenntnisse. Alle Offshore-Bohrkerne enthielten gefrorene Sedimente und die Höhe der Phasengrenze wurde mit zunehmender Distanz zur Küste geringer. Basierend auf typischen kryogenen Strukturen und den Isotopenwerten des Poreneises konnte man die Sedimente als überfluteten sibirischen Eiskomplex identifizieren. Mithilfe jüngster Küstenerosionsraten konnte nachgewiesen werden, dass die obere Grenze der gefrorenen Sedimente bereits nach nur 2500 Jahren Überflutung 35 m unter dem Meeresspiegel liegen können. Ein überraschendes Ergebnis war, dass man im am weitesten von der Küste entfernten Bohrloch unterhalb einer Tiefe von 64,7 m unter dem Meeresspiegel auf fast vollständig ungefrorene und eisfreie Sedimente stieß. Dieser Fund stand im Gegensatz zu den Modellen, die einen 400-600 Meter mächtigen, durchgehenden Permafrost in dieser Gegend vorhergesagt hatten.

Insgesamt legen die Forschungsergebnisse der Expedition nahe, dass submariner Permafrost wärmer und weniger ausgedehnt ist als zuvor erwartet, vor allem auf dem Schelf der Laptevsee, dessen Großteil seit mehr als 6000 Jahren überflutet ist.

*Volker Rachold, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Waldemar Schneider*

Abbildung 3: Bedienung des Bohrergeräts. Abbildung 4: Probennahme von Porenwasser (-eis) vor Ort.



## Die frühe Forschungsstation Insel Samoilow und ihre Erweiterung 2005

1998 brach die erste von nunmehr 20 Expeditionen ins Lenadelta auf, eines der größten Deltas (32.000 km<sup>2</sup>) der arktischen Region. Auf dieser Expedition, Expedition LENA 1998 genannt, kamen etwa 30 russische und deutsche Wissenschaftler, Studenten und Techniker aus verschiedenen Forschungsbereichen zusammen. Die Forschungsstation Insel Samoilow war zum ersten Mal das logistische Basislager, in dem die Langzeituntersuchungen zur Entstehung und zum Abbau von Permafrost, zu Bildung und Freisetzung von Treibhausgasen (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) sowie zu thermischen und hydrologischen Bedingungen in der Auftauzone ihren Anfang nahmen.

Die Insel Samoilow (72°22'N, 126°28'E) ist eine repräsentative Insel im aktiven und jüngsten Teil (8.000-9.000 Jahre) des Lenadeltas. Sie erstreckt sich über ein Gebiet von 1.200 ha und hat eine Höhe von 2 bis 14 m über dem Meeresspiegel (Abbildung 1). Die Westküste der Insel ist durch rezente Anreicherungsprozesse mit fluviatilen und äolischen Sedimenten charakterisiert. Drei Überflutungs-

Abbildung 1: Die Insel Samoilow und durch Küstenerosion verlorenes Land in den Jahren 1952, 1964 und 2007. (G. Stoof)



gebiete mit unterschiedlichen Überflutungsfrequenzen und unterschiedlicher Vegetationsbedeckung lassen sich voneinander abgrenzen. Die akkumulierten Sedimente bestehen hauptsächlich aus feinen bis mittleren Sanden. Im Gegensatz dazu wird die Ostküste Samilows von Erosionsprozessen geprägt, die zur Bildung der großen Erosionskliffs der Insel geführt haben. Dieser Bereich setzt sich aus verschiedenen Ablagerungen (Sande, Schluffe, Torfe) des mittleren Holozäns zusammen und macht ca. 70% der Gesamtfläche der Insel aus.

Die ehemalige kleine Forschungsstation Insel Samoillow des Lenadelta-Reservats entwickelte sich zu einem idealem Standort für die küstennahe und terrestrische Polarforschung in der russischen Arktis. Die Station ist von Tiksi (das über einen Flughafen mit Verbindungen nach Moskau, St. Petersburg und Jakutsk verfügt) mit dem Helikopter in etwa 45 Minuten oder mit dem Schiff in 12 Stunden zu erreichen.

Die Station wurde als ein großes Holzgebäude auf im Permafrost verankerten Pfählen mit verputzten Außenwänden gebaut. Ein Waschhaus, eine Sauna, drei kleine Lager-Schuppen aus Holz und eine große Vorratskammer im gefrorenen Boden (russisch = lednik) vervollständigen das Stations-Ensemble (Abbildung 2), das sich sehr gut in die polygonale Tundralandschaft des Lenadeltas einfügt.

Das Gesamtareal bemisst etwa 190 m<sup>2</sup>, von denen 120 m<sup>2</sup> für Expeditionsarbeiten genutzt werden können.

Abbildung 2: Forschungsstation Insel Samoillow: Hauptgebäude und Lager, Blick aus Südwest. (Helikopterfoto 2001)



Der westliche Teil wird vom lokalen Stationsleiter des Lenadelta-Reservats (LDR) genutzt. Die verfügbaren Zimmer umfassten eine Küche (10,7 m<sup>2</sup>), ein Schlafzimmer und zwei Labore für die wissenschaftliche Arbeit. Ein 6 KVA Dieselgenerator (Honda ECT 6D) versorgte die allgemeine Ausstattung und die wissenschaftlichen Arbeitsgeräte (GC, Computer, etc.) mit ausreichend Strom.

In den ersten drei Jahren musste Trinkwasser mithilfe eines mobilen Wassertanks von einem nahegelegenen See zur Station transportiert werden, aber mittlerweile ist ein Pumpensystem installiert. Die nahegelegene Sauna wird auch als Badezimmer genutzt. Eine Toilettenhütte liegt 50 m von der Station entfernt.

Das Universallabor hat eine Größe von etwa 15 m<sup>2</sup> und ist mit zwei Werkbänken mit einer Gesamtlänge von 6,5 m ausgestattet. Das zweite Labor ist etwa 12 m<sup>2</sup> groß und mit einem Gaschromatographen (Chrompack CP-9003 mit FID- und WLD-Detektor) und einem Wasserstoffgenerator (Domnick Hunter UHP-20H) für Spurengasanalysen ausgestattet (Abbildung 3).

Ein neues Nebengebäude wurde 2005 in einem 90°-Winkel zum bestehenden Gebäude errichtet (s. Seiten 66-67). Es ist mit der alten Station durch den Vorraum verbunden. Das neue Gebäude bietet eine zusätzliche Fläche von 68 m<sup>2</sup>, die in drei Schlafzimmer und ein großes Wohnzimmer unterteilt wurde. Es wurde besonders auf die Isolation des Nebengebäudes geachtet, um auch im Winter Forschungsaktivitäten im Lenadelta zu ermöglichen. Die erweiterte Station bietet Platz für 8 Wissenschaftler im Winter und bis zu 16 im Sommer durch die Nutzung von zusätzlichen Zelten.

Die Langzeitversuchsflächen - inklusive der automatischen Klima- und Bodenmessstationen - können leicht in zwei Minuten Gehzeit von der Hauptstation aus erreicht werden. Die Messflächen liefern seit 1998 qualitativ gute klimatische

Abbildung 3: Labor für Spurengasanalysen (z. B. ausgestattet mit Gaschromatograph und Wasserstoffgenerator) und Probenvorbereitung für mikrobiologische und pedologische Analysen. (Foto: D. Wagner)

Abbildung 4: Bau der neuen deutsch-russischen Forschungsstation Insel Samoilow organisiert durch das AWL und das Lenadelta-Reservat. Hintergrund: alte Station. (Foto: G. Stoof)



und bodenbezogene Temperaturdaten. Halbautomatische Spurengasmessungen wurden einige Jahre später hinzugefügt.

2002 wurden die Langzeitstudien der Kohlenstoffdynamik durch ein mikrometeorologisches Eddy-Kovarianz-Messsystem ergänzt, das entwickelt wurde, um durchgehend turbulente Kohlenstoffdioxid- und Methanflüsse, Auftrieb, Wärme und Wasser in der atmosphärischen Grenzschicht zu messen. Das komplexe Messsystem wurde zum ersten Mal während der LENA 2002 Expeditionen im Lenadelta in Nordsibirien eingesetzt. Die Flussmessungen wurden während der Vegetationszeit parallel zu den standardmäßigen Erhebungen von meteorologischen und bodenphysikalischen Daten durchgeführt. Die erhaltenen Datensätze ermöglichten eine Verknüpfung der Energie- und Wasserbilanzen der Perma-

Abbildung 5: Landverlust nahe des Stationsareals auf Samoilow durch Küstenerosion in den Jahren 2003 bis 2016. Zu sehen sind die alte Station und der südliche Teil der neuen Station. (Foto: G. Stoof)

frostlandschaften mit den Kohlenstoffaustauschprozessen zwischen Permafrostböden, Tundravegetation und Atmosphäre. Solche Studien waren notwendig für die Validierung und Verbesserung von Prozessmodellen, die den Einfluss von Umwelt- und Klimaveränderungen auf arktische Ökosysteme bewerten.

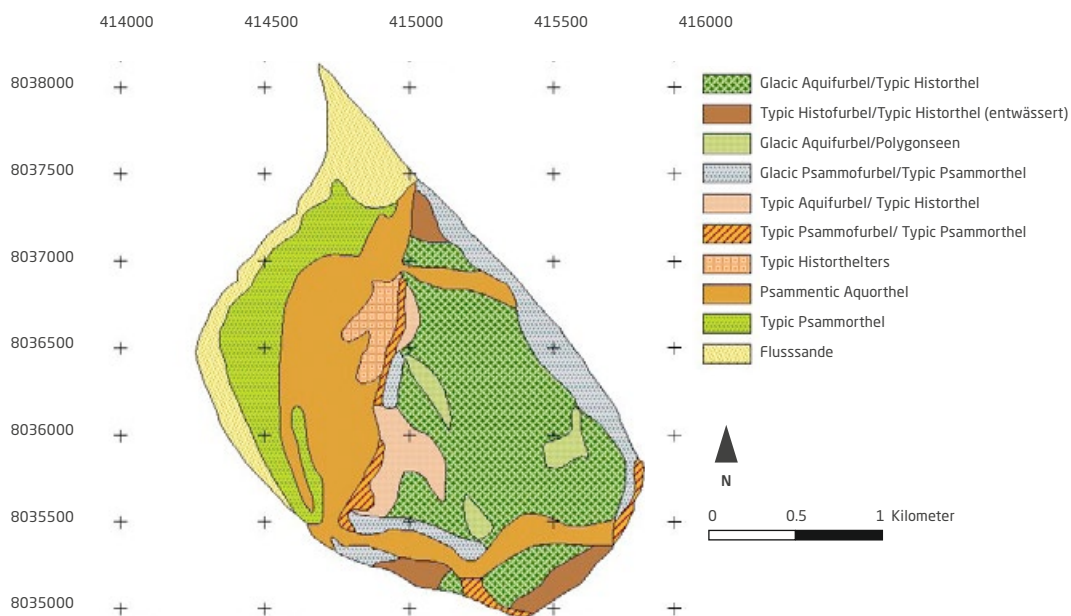
Außerdem wurde ein breites Spektrum an weiterer Forschung auf Samoillow und in der Umgebung durchgeführt, die mit kleinen Schlauchbooten oder Binnenschiffen erreichbar war. In den vergangenen 20 Jahren haben russische und deutsche Expeditionsteilnehmer die Forschungsstation Insel Samoillow für eine Vielzahl an Studien genutzt, z. B. hydrobiologische Untersuchungen im Lenadelta, Studien zur jüngsten Kryogenese, Beobachtungen der Energie- und Wasserbilanz der Tundra in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Maßstäben und geomorphologische Studien im Lenadelta sowie Studien zum späten Quartär.

Da die Lena die Küstenlinie von Samoillow vor allem während des Eislaufbruchs im Frühjahr erodiert (siehe Abbildung 5), ist die Abbruchkante bis auf 10 m an die Station herangerückt und die Stabilität und verbleibende Nutzungsdauer der Station wurden zunehmend gefährdet. Infolgedessen beschloss das AWI zusammen mit dem Lenadelta-Reservat, eine neue Station an einem höheren Punkt der Insel zu bauen.

Im Sommer 2010 wurde von beiden Parteien ein Vertrag unterzeichnet und die Baumaterialien wurden zur Insel transportiert. Der Bau der neuen Station begann mit der Verankerung von Holzpfählen im gefrorenen Boden. Die Bauarbeiten dauerten bis zum Sommer 2011 an, aber sie mussten im selben Jahr gestoppt werden: Der Platz wurde für den Bau der neuen Forschungsstation Insel Samoillow benötigt, die der Initiative von Russlands Präsident Wladimir Putin zu verdanken ist (siehe Abbildung 4).

Seit der Einweihung der neuen Forschungsstation Insel Samoillow (siehe Seiten 153-158) und den ersten Expeditionsarbeiten im Frühjahr 2013 wird die alte Station nicht mehr als bilaterale Forschungsstation zwischen Russland und Deutschland eingesetzt. Sie wird nur als Nebengebäude und für den Stationsleiter des Lenadelta-Reservats genutzt.

*Hans-Wolfgang Hubberten, Julia Boike, Eva-Maria Pfeiffer, Günter Stoof, Alexander Yu. Gukov*



**Bodenkarte von Samoiloiv**  
 Transversale Mercator-Projektion (Pulkova-1942, Zone 22), Spheroid: Krasovskiy

## Installation des Samoiloiv Observatoriums - wissenschaftliches Monitoring von Klimadaten, Permafrostböden und Treibhausgasen (Untersuchungen 2002-2006)

Rasante Veränderungen in der nordostsibirischen Arktis mit ihren sensiblen permafrostbeeinflussten Böden, ihrem einzigartigen Tundra-Ökosystem und ihren eisreichen Landschaften animierten die russischen und deutschen Permafrostforscher zum Handeln. Sie installierten moderne Messinstrumente auf der Insel Samoiloiv, um alle wichtigen Faktoren des Kohlenstoffkreislaufs, mit einem Fokus auf der Treibhausgas-Bilanz, zu untersuchen.

### Fortschritte im Bereich der Studien permafrostbeeinflusster Böden

Eine neue automatische Messstation für Boden-, Umwelt- und Klimadaten wurde im August 2002 auf Samoiloiv eingerichtet, um einige technische Probleme der ersten Station von 1998 zu beseitigen. Basierend auf detailliertem Wissen

Abbildung 1: Verteilung von permafrostbeeinflussten Böden (Gelisolen) auf Samoiloiv. Karte basierend auf Bodenvermessung während der LENA 2001 Expedition (nach Pfeiffer et al. 2002).





(erlangt auf den Expeditionen 1998-2001) über die Morphologie, Eigenschaften und Verteilung von Böden (siehe Abbildung 1) wurde ein Standort für die neue Bodenmessstation identifiziert und in einem interdisziplinären Einsatz errichteten die Bodenkundler und Techniker des Expeditionsteams die neue Station (siehe Abbildung 2). Die Sensoren der Station ermöglichten Messungen von Variablen wie Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung und Niederschlag, Schneehöhe, Bodentemperatur sowie volumetrischem Wassergehalt und Wärmeflüssen im Boden.

Ein Programm zur Beobachtung der Auftautiefe begann 2002 in unmittelbarer Nähe zu der neuen Station (siehe Abbildung 3). Innerhalb eines Areals von 28 m x 18 m wurde ein Raster von 150 Messpunkten in Abständen von 2 m x 2 m markiert und mit einem Lasertachymeter kartiert. Die jahreszeitenabhängigen Entwicklungen der Auftautiefe wurden während aller Expeditionen von 2002 bis heute an den 150 Messpunkten gemessen.

Abbildung 2: Installation der neuen Messstation für Boden und Meteorologie: Verwendung eines Eiskernbohrers für die Installation von Sensoren im Eiskeil des Polygons.



In Kombination mit den Messungen der mikrometeorologischen Land-Atmosphäre-Flüsse ermöglicht die automatische Messstation für Boden und Meteorologie (siehe unten) die Analyse der Verknüpfung von Wasser- und Energiebilanz in Landschaften permafrostbeeinflusster Böden mit dem Kohlenstoffaustausch (z. B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) zwischen Gelsolen, der Tundravegetation und der atmosphärischen Grenzschicht in Oberflächennähe. Bodenbezogene Daten sind wichtig für die Bewertung der Frage, ob sich die polygonale Tundra der sibirischen Tiefländer in der Permafrostzone von einer Kohlenstoffsенke zu einer Kohlenstoffquelle entwickelt hat. Um diese Frage exakt beantworten zu können, müssen wir die Langzeitmessstation für Boden und Meteorologie auf Samoilow weiterhin technisch unterstützen, um die sich ändernde Kohlenstoffbilanz und die räumliche Variabilität von Spurengasflüssen in größerem Umfang untersuchen zu können. Die aufgezeichneten Daten sind erforderlich, um den Einfluss der anhaltenden Erwärmung in der sibirischen Arktis beurteilen und unserer Gesellschaft vernünftige Ratschläge in einer sich verändernden Welt geben zu können.

### **Eddy-Kovarianz-Methodologie für Studien zur Treibhausgasemission auf Samoilow**

Die mikrobiellen Prozessstudien und einfachen Messungen in geschlossenen Messkammern aus den Jahren 1998–2001 lieferten interessante vorläufige Ergebnisse über den komplexen Kohlenstoffkreislauf in der polygonalen

Abbildung 3: Messung der Auftautiefe mit einem stählernen Permafroststab im September 2003. (Foto: U. Zimmermann)

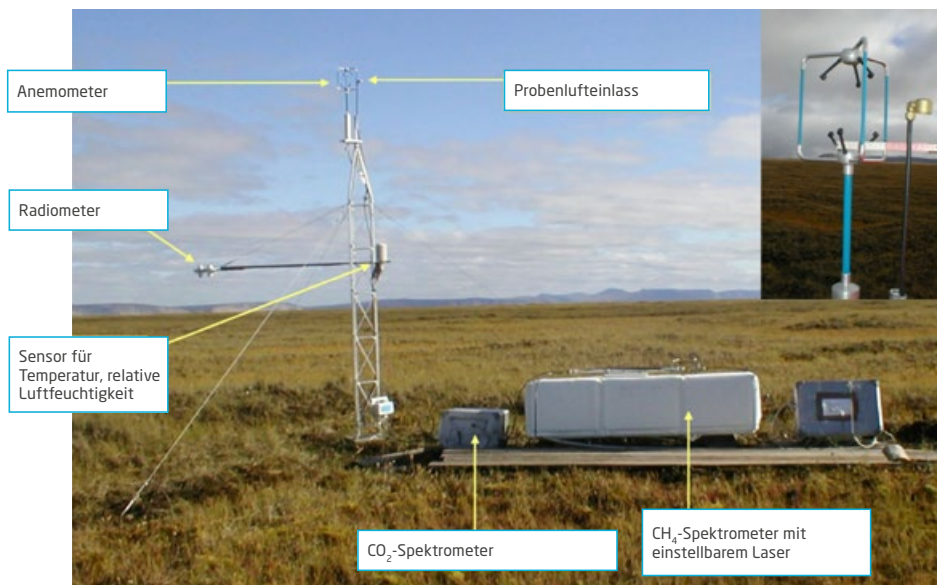


Abbildung 4: Das Eddy-Kovarianz-Team im Juni 2002 auf Samoilow - raue Wetterbedingungen, aber das Team freut sich, dass die sensiblen Instrumente und der Generatorkraftstoff die Insel erreicht haben.

Abbildung 5: Das Eddy-Kovarianz-System verfügt über ein Drei-Axen-Ultraschallanemometer (an der Spitze des Masts und in der Detailaufnahme oben rechts), eine Infrarot-CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-Analysesystem, und ein CH<sub>4</sub>-Analysesystem basierend auf Infrarotspektroskopie mit einstellbarem Laser und Stromquelle.

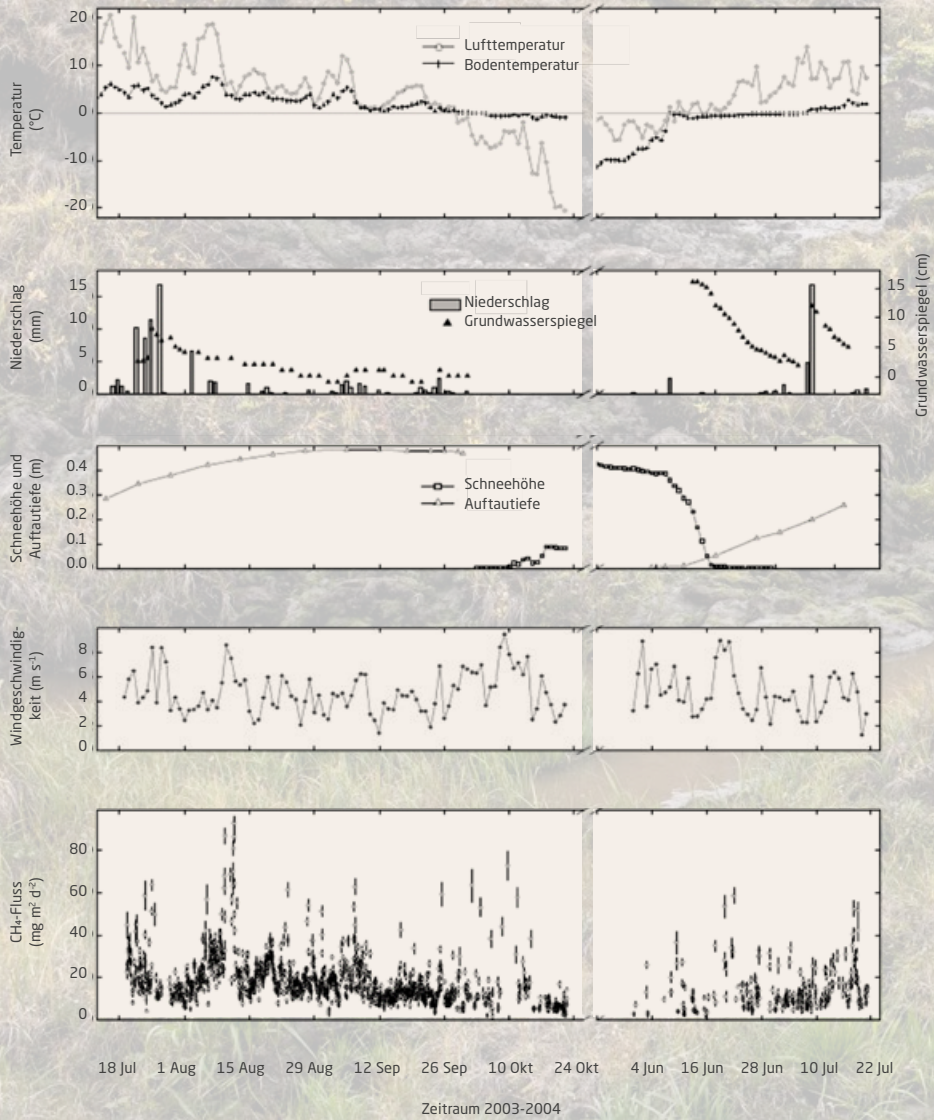


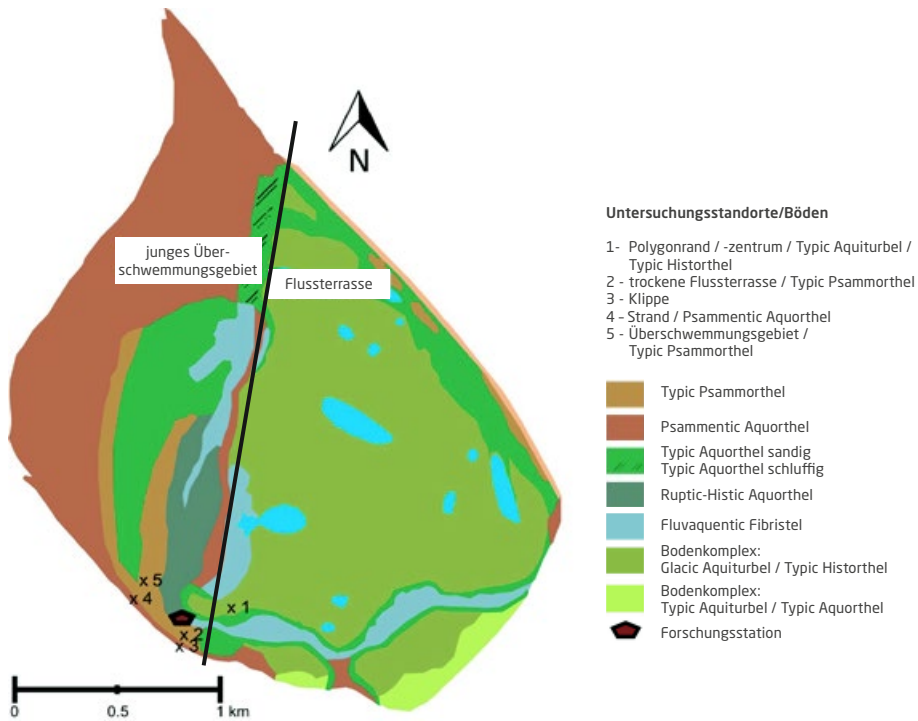
Abbildung 6: Vom Eddy-Kovarianz-System aufgezeichnete Daten inklusive CH<sub>4</sub>-Emissionsraten für Juli-Oktober 2003 und Juni-Juli 2004 (Wille et al. 2008). (Hintergrundfoto: P. Verzone)

Tundra. Für eine bessere Quantifizierung der zeitlichen Variabilität der  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Bilanzen wurde jedoch 2002 die Qualität der Treibhausgasstudien verbessert, indem ein mikrometeorologisches Eddy-Kovarianz-Flussmesssystem auf Samoillow eingerichtet wurde (siehe Abbildung 4). Die Methodologie der Eddy-Kovarianz ermöglicht die Bestimmung von Gasflüssen in hoher zeitlicher Auflösung, integriert in einen landschaftlichen Maßstab und ohne eine Störung des untersuchten Boden-Vegetations-Ökosystems. Die Hauptbestandteile des Eddy-Kovarianz-Systems sind in Abbildung 5 zu sehen. Die erste Generation des Eddy-Kovarianz-Systems wurde im Juni 2002 im Herzen der polygonalen Tundra auf der ersten Flussterrasse installiert, die Teil von Samoillow ist.

Nachdem einige zeitintensive und Geduld erfordernde technische Probleme gelöst worden waren, die beim Generator angingen und beim einstellbaren Diodenlaser aufhörten, konnte die Expeditionsgruppe endlich die Eddy-Kovarianz-Technik auf Samoillow installieren, welche während vieler nachfolgender Expeditionen erfolgreich bedient werden konnte. Diese hochmoderne Anlage zeichnete Langzeit-Flussdaten auf, welche eine erste Bewertung der jeweiligen Stärke von Kohlenstoff- und Methansenken und -quellen in der polygonalen Tundra im Lenadelta ermöglichten (siehe Abbildung 6). Die Fortführung dieser einzigartigen Datenerhebung im Bereich der Kohlenstoffflüsse in Russland ist essentiell für die internationalen Erdsystemwissenschaften (siehe auch Seite 177-179).

Wichtige Schlussfolgerungen aus den Analysen der Flussraten von  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  sind: (1.) In den meisten Jahren ist die nordsibirische polygonale Tundra immer noch eine robuste  $\text{CO}_2$ - und Kohlenstoffsénke. (2.) HeiÙe Sommer können jedoch die sommerliche  $\text{CO}_2$ -Aufnahme so stark reduzieren, dass die Tundra auf das Jahr gerechnet eine Kohlenstoffquelle ist. (3.) Die  $\text{CH}_4$ -Flüsse sind vergleichsweise niedrig und nicht signifikant für die Kohlenstoffbalance, aber stark genug, um den das Klima abkühlende Strahlungsantrieb durch die jährlichen  $\text{CO}_2$ -Aufnahme aufzuheben - sogar in Jahren, die in Bezug auf die Temperatur normal sind.

*Lars Kutzbach, Christian Wille, Torsten Sachs, David Holl, Günter Stoof, Julia Boike, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer*

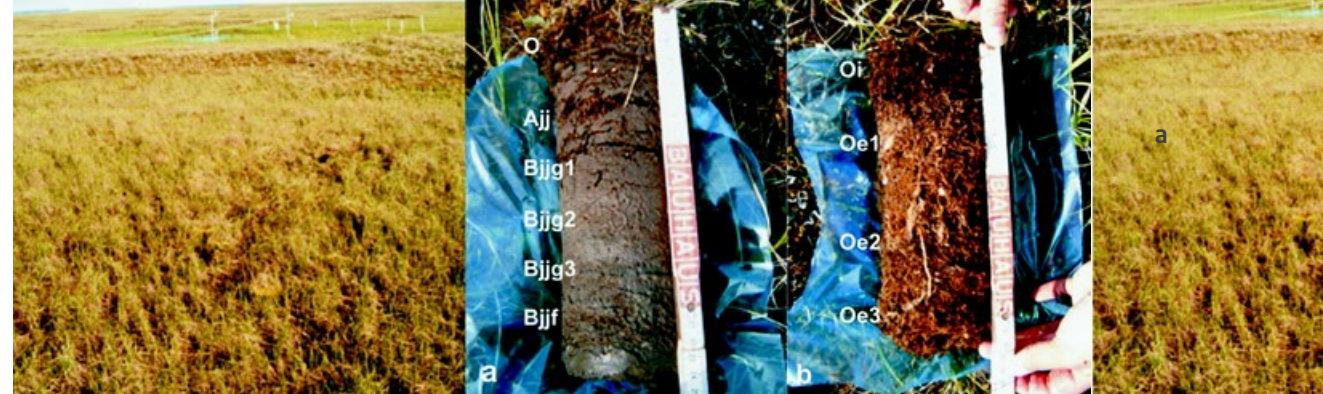


## Mikrobieller Stickstoffumsatz in der Auftauschicht und den tieferen Permafrostsedimenten des Lenadeltas

Feldstudien auf Samoillow in den Jahren 2004 und 2005 zeigten, dass der Stickstoffkreislauf in Permafrostböden hauptsächlich von Bodenfeuchtigkeit und -struktur abhängt. Variationen in den Stickstoffumwandlungen kommen folglich in kleinen räumlichen Maßstäben vor. Ammonium sammelte sich in den Böden der Polygonzentren an, wenn diese feucht und anaerob waren und Methan enthielten. Währenddessen wurden nur niedrige Nitrit- und Nitratkonzentrationen gemessen. Diese Daten korrelieren mit einer niedrigen Zellanzahl und geringen Aktivität von ammoniakoxidierenden Mikrobengemeinschaften. Im Gegensatz dazu korrelierten in den trockeneren, aeroben Bereichen der Polygonränder hohe Nitratwerte und niedrige Werte an hemmendem Methan mit einer hohen Anzahl an Zellen und hohen Aktivität von ammoniakoxidierenden Bakterien.

Abbildung 1: Bodenkarte von Samoillow mit den untersuchten Standorten (Sanders et al., 2010). Die schwarze Linie zeigt die Aufteilung der Insel in die weniger stickstoffbegrenzten Böden (*Typic Psammorthel*, *Psammentic Aquorthel*, *Typic Aquorthel Sandy* und *Silty*) der jungen Überschwemmungsgebiete und der trockenen Flussterrassen im Westteil der Insel sowie die stärker stickstoffbegrenzten Böden der polygonalen Tundra, vor allem dem *Typic Historthel* in der feuchten Flussterrasse auf der Ostseite der Insel.

Abbildung 2: Standort- und Bodenprofil der Flussterrassenböden (a: Standort 1, b: Standort 2 in Abbildung 1) und des jungen Überschwemmungsgebiets (c: Standort 4, d: Standort 5 in Abbildung 1) (Sanders et al., 2010). a: *Typic Aquiturbel* des Polygonrandes und *Typic Historthel* des Polygonzentrums, b: *Typic Psammorthel* nahe der alten Station, c: *Psammentic Aquorthel* am Strand, d: *Typic Psammorthel* im Überschwemmungsgebiet.

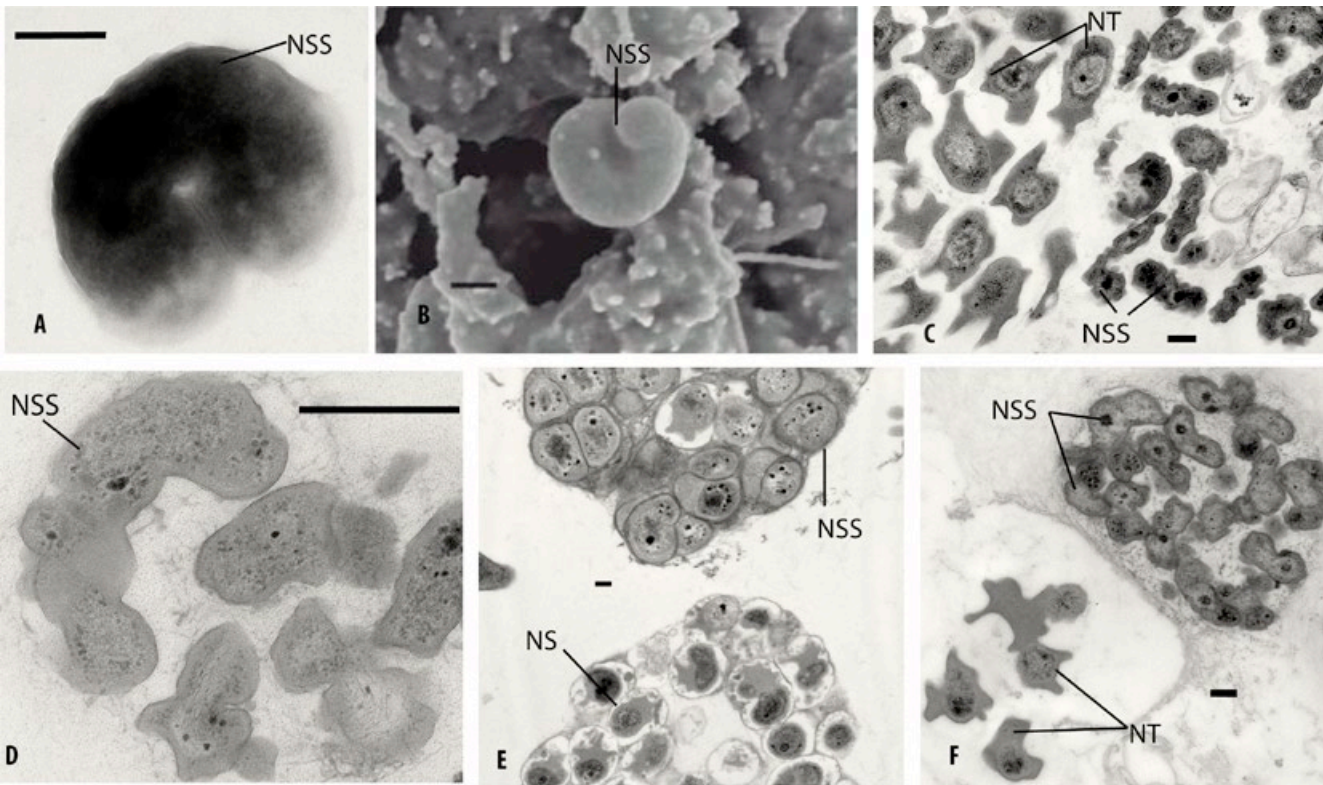


Untersuchungen der Stickstoffkreisläufe während der Sommerexpedition 2008 wurden auf Gebiete jenseits der polygonen Tundra ausgeweitet und umfassten Böden der trockeneren Flussterrassen, erodierende Klippen und junge Überschwemmungsgebiete. Die Konzentration von gelöstem Stickstoff ist abhängig von der Menge organischer Stoffe, der Luft- und Bodentemperatur und der Bedeckung durch Vegetation. Ammonium war nur am Anfang der Vegetationsphase in Böden, die reich an organischen Stoffen waren, nachweisbar (bis zu  $10 \mu\text{g g}^{-1}$  Trockengewicht ('dry weight', dw)). Nitrit wurde nur an sehr kalten Tagen mit Bodentemperaturen unter  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  (bis zu  $2,3 \mu\text{g g}^{-1}$  dw) angereichert. Am Ende der Vegetationsphase beschränkte sich die Anreicherung von Nitrat auf Böden ohne Vegetation (bis zu  $90 \mu\text{g g}^{-1}$  dw). Relativ hohe Nitrifizierungskapazitäten wurden in den trockenen und sandigen Böden der Überschwemmungsgebiete und der trockenen Flussterrasse entdeckt. In der polygonalen Tundra war die Nitrifizierungskapazität nur im Mineralhorizont des Polygonrandes nachweisbar.

Zusammengefasst zeigen diese Ergebnisse, dass permafrostbeeinflusste Böden nicht generell stickstofflimitiert, mit niedrigen Werten an anorganischem Stickstoff und gering in ihrer Anzahl an stickstoffverarbeitenden Organismen sind. Stattdessen gibt es Variationen in der Stickstoffbegrenzung in kleinen räumlichen Maßstäben. Insgesamt waren Böden der jungen Überschwemmungsgebiete und der Polygonränder der Flussterrasse weniger stickstofflimitiert als Böden der Polygonzentren (Abbildung 1, 2). Die weniger stickstofflimitierten Böden zeichneten sich durch geringere Bodenfeuchte, geringere C/N-Unterschiede und höhere pH-Werte aus. Diese Böden wiesen auch Stickstoffmineralisations- und Nitrifizierungsaktivitäten auf. Daher verringert sich der Ammoniumgehalt während der Vegetationsphase und Nitrat sammelt sich insbesondere in vegetationsfreien Böden an (Abbildung 2c). Die Ergebnisse zeigten zudem, dass Böden, Relief und Mikrotopographie eine entscheidende Rolle bei der Kontrolle der Zusammensetzung der stickstoffverarbeitenden ammoniakoxidierenden Mikrobengemeinschaft spielen, welche von Bakterien der Gattung *Nitrosospira* und nicht von Archaeen dominiert wurde (Abbildung 3).

Basierend auf diesen Forschungsergebnissen zum Stickstoffkreislauf und dem Verständnis, dass eine weit verbreitete Degradation von Permafrost vorliegt, wurde die Freisetzung von anorganischem Stickstoff 2012 an verschiedenen anderen Standorten der östlichen sibirischen Arktis untersucht. Modellberechnungen für die Polygonränder auf Samoillow schätzten die maximale Zunahme in der Tiefe der Auftauschicht im Vergleich zu den östlich gelegenen Standorten





des des Indigirka-Tieflandes und des Kolymadeltas bis 2100. Verglichen mit den anderen Standorten war der Gesamtgehalt an Kohlenstoff, Stickstoff und Ammonium im Permafrost höher als in der Auftauschicht auf Samoillow, nicht aber der Nitratgehalt. Diese Speicherung an anorganischem Stickstoff (‘inorganic nitrogen’, DIN) im Permafrost kann in erheblichen Freisetzungen von Stickstoff an den Polygonrändern von  $(22 \pm 4) \text{ N mg Jahr}^{-1} \text{ m}^{-2}$  und  $(8 \pm 3) \text{ N mg Jahr}^{-1} \text{ m}^{-2}$  im Polygonzentrum resultieren, aber der Fluss ist gering im Vergleich zur Stickstoff-Gesamtbilanz des Ökosystems.

*Claudia Fiencke, Tina Sanders, Fabian Beermann, Elena E. Lebedeva, Eva-Maria Pfeiffer*

Abbildung 3: Elektronenmikroskop-Abbildung angereicherter Kulturen von Ammoniak und Nitrit oxidierenden Bakterien aus den Böden auf Samoillow.

1. A: Aufnahme einer Negativfärbung, B: Rasterelektronenmikroskop-Abbildung (REM), C-F: Transmissionselektronenmikroskop-Abbildung (TEM) mit *Nitrospira*-ähnlichen, *Nitrosospira*-ähnlichen und *Nitrotoga*-ähnlichen Zellen. Größenbalken=0,2 µm, NS: *Nitrosospira*, NSS: *Nitrospira*, NT: *Nitrotoga*. (Fotos: T. Sanders)



## Geokryologische und paläoökologische Studien an den Küsten der Laptewsee

Während der LENA-Expedition 2002 brachte das eisgängige Forschungsschiff „Pavel Bashmakov“ Forscher zu den Küsten der Neusibirischen Inseln und dem nahegelegenen Festland. Als Teil dieser russisch-deutschen Kooperation wurden vom 14. August bis 2. September 2002 zwölf Standorte vermessen, die meisten zum ersten Mal.

Die russischen und deutschen Wissenschaftler an Bord wollten neue Erkenntnisse über die Entwicklungsgeschichte der Neusibirischen Inseln gewinnen. Das Arbeitsprogramm konzentrierte sich auf die Paläoumwelt und Küstendynamik. Ein Teil des Teams war mit der Erforschung und Probennahme von Permafrostprofilen an verschiedenen Standorten für nachfolgender Laboranalysen beschäftigt. Die Ergebnisse dieser Forschung werden uns helfen, die Entwicklung der Paläoumwelt zu rekonstruieren. Alle Teilnehmer sammelten fossile Knochen in der Uferzone in der Nähe der Aufschlüsse. Diese Funde ermöglichten es unserer

Abbildung 1: Anlandung auf der Insel Neusibirien.



russischen Paläontologin Tatyana Kuznetsova, einer Spezialistin für große Säugetiere, die Artenzusammensetzung der Säugetierfauna speziell in der Eiszeit sowie deren Entwicklung im Laufe der Zeit zu bestimmen. Die Vielfalt geologischer Strukturen an den Forschungsstandorten erlaubte es uns, Permafrostsequenzen unterschiedlicher Struktur und unterschiedlichen Alters zu untersuchen. Wir fanden bei jeder Anlandung etwas Neues. Im Folgenden beschreiben wir eine solche Anlandung im Detail.

Am 21. August landeten wir an der Insel Neusibirien an. Das Forschungsschiff musste einige Kilometer von der Küste entfernt vor Anker gehen, da sein Tiefgang keine weitere Annäherung erlaubte. Der Wellengang war mäßig; es würde etwa eine Stunde dauern, mit unserem Landungsboot zum Ufer zu gelangen. Bald wurde klar, dass das flache Gefälle des Meeresbodens es uns nicht ermöglichen würde, in unserem Boot nah ans Ufer heranzukommen. Zu diesem Zeitpunkt waren wir fünfzig Meter von der Insel entfernt, umgeben von Eisschollen, die um uns herum im flachen Wasser gestrandet waren. Nach einer kurzen Besprechung entschlossen wir uns, an Land zu waten. Jeder unserer fünfzehn Teilnehmer, ausgestattet mit Watstiefeln, sprang ins Wasser und trug unsere Ausrüstung

Abbildung 2: Das Forschungsschiff „Pavel Bashmakov“ im Treibeis.



und Werkzeuge durch die Wellen an Land. Der Lotse unseres Landungsbootes kehrte zum Schiff zurück. Unweigerlich füllten sich manche Stiefel mit eiskaltem Wasser. Sobald wir an Land waren, entfachten wir ein Lagerfeuer aus Treibholz, um unsere nassen Füße und Stiefel zu trocknen und uns zu wärmen. Dann teilten wir uns in kleine Gruppen auf, um unsere verschiedenen Aufgaben zu erfüllen: Küstenvermessung, Probenahme von Sedimentprofilen und allem, was in diesen Sedimenten enthalten war und Sammlung von fossilen Überresten von Tieren und Pflanzen. Wir blieben durchgehend über Funk in Kontakt mit der Besatzung des Hauptschiffs, um uns über die aktuellen Wetterbedingungen zu informieren. Das Wetter verschlechterte sich. Es wurde neblig und ein feiner Niederschlag setzte ein. Trotzdem schafften wir es, ein großes Profil der Küstenklippe von oben bis unten zu beproben. In eiskaltem Schlamm stehend nahmen wir Sedimentproben, notierten Positionen der Probenentnahmen, beschrieben Sediment- und Eisstrukturen, erfreuten uns an kleinen organischen Überresten, die möglicherweise datierbar waren, und rutschten allmählich immer weiter im Schlamm Richtung Strand.

Ein paar hundert Meter westlich fanden wir deutlich marine Ablagerungen am Kliff in Höhen von bis zu 3 Metern über dem Meeresspiegel. In den tonigen Sedi-

Abbildung 3: Marine Sedimente mit drop-stones im Strandniveau.

Abbildung 4: Vorbereitung für die Entnahme von Grundeis-Proben an einem vermutlich begrabenem Gletschereisrest.

menten, die kleine Schalenreste enthielten, entdeckten wir einen großen Stein, einen sogenannten drop-stone. Drop-stones wurden ursprünglich von einem Eisberg transportiert und fielen ins Wasser, als der Eisberg schmolz. Die drop-stones gruben sich tief in den weichen Meeresgrund ein. Wir fanden weitere Exemplare und können daher annehmen, dass diese Ablagerungen zu Zeiten hoher Eisbergaktivität entstanden. Letztlich bedeutet das Vorkommen von marinen Sedimenten über dem Meeresspiegel, dass entweder der Meeresspiegel seit deren Ablagerung gesunken ist oder sich das Land angehoben hat. Wir halten letztere Erklärung für wahrscheinlicher, da die Neusibirischen Inseln in einem tektonisch sehr aktiven Gebiet nahe der Grenze von Eurasischer und Nordamerikanischer Platte liegen.

Plötzlich erregte eine rote Signalarakete unsere Aufmerksamkeit, die in die Luft abgefeuert worden war und nun langsam ins Meer sank. Es war das vereinbarte Zeichen, dass wir sofort unsere Arbeit beenden und zur Landungsstelle zurückkehren sollten. Wir wussten, warum man uns zurückrief: Wir hatten den zunehmenden Wind Richtung Küste und das zunehmende Sprühwasser über den Wellen bemerkt. Wir konnten sehen, dass sich das Landungsboot auf dem Weg zu unserem Treffpunkt bereits der Küste näherte. Der Nebel war nun dichter und der inselwärts gerichtete Wind drückte das Wasser den Strand herauf. Ein einfacher Einstieg in das Landungsboot war unmöglich. Wir alle schafften es, nach mehreren Versuchen dankbar in das Landungsboot zu kraxeln und dann begann die eiskalte, neblige und mehr als einstündige Rückreise, auf der wir von Wellen umhergeschleudert wurden. Wir verloren jegliche Orientierung, während sich das klirrend kalte Sprühwasser wieder und wieder über uns ergoss. Wir starrten in die Ferne in dem Versuch unser Mutterschiff zu erspähen. Plötzlich tauchte die wuchtige Form der „Pavel Bashmakov“ vor uns aus dem Nebel auf. Die Sichtweite betrug weniger als zwanzig Meter. Uns wurde zurück auf dem Schiff ein warmes Willkommen mit Wodka und einer auf 120 °C vorgeheizten Sauna bereitet, ein angenehmes Ende dieses abenteuerlichen und erfolgreichen Tages. Die Schiffsexpedition im Jahr 2002 sollte in erster Linie eine Erkundungstour werden. Trotzdem wurden Ergebnisse der an den Landungsstellen genommenen Probenreihen in einige Veröffentlichungen und wissenschaftliche Arbeiten einbezogen, und unsere Erkundungen wurden zur Grundlage weiterer Expeditionen in diese Gegend.

*Lutz Schirrmeister, Christine Siegert, Guido Grosse, Hanno Meyer, Mikhail N. Grigoriev, Viktor V. Kunitsky*



## Langzeitbeobachtungen der pelagischen Fauna in Seen und Tümpeln des Lenadeltas

Das Lenadelta ist ein Gebiet der Tundra mit einer enormen Anzahl an großen und kleinen Flussarmen und Seen: Permanente und vorübergehende Wasserreservoirs unterschiedlichen Ursprungs. Verschiedene, wenig erforschte freischwimmende wirbellose Tiere, hauptsächlich Krusten- und Rädertiere, bewohnen in großen Zahlen all diese Reservoirs. Trotz ihrer geringen Größe spielen diese Vertreter der aquatischen Fauna eine wichtige Rolle für Material- und Energieflüsse in den Ökosystemen der Tundra. Sie sind ein wichtiger Bestandteil der Nahrungsketten in Gewässern und eine Nahrungsquelle für viele wirbellose Räuber, Jungfische und Wasservögel.

Unsere Erforschung der Wasser-Ökosysteme im Lenadelta begann 1987 im nördlichen Teil des Deltas auf der Insel Sagastyr und südlich des Deltas auf Tit-Ary. Jährliche Beobachtungen der pelagischen Fauna werden auf Samoillow seit 2000 durchgeführt. Zu dem Zeitpunkt war das Basislager der Expedition „Lenadelta“

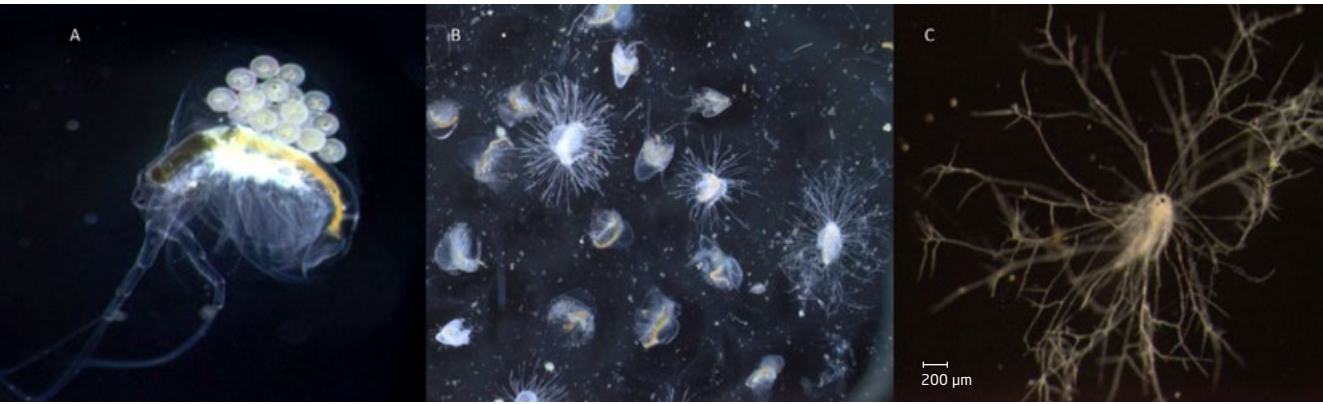
Abbildung 1: Unsere Hydrobiologie-Ecke in der alten Station (links) und der Mikroskop-Raum im Labor der neuen Forschungsstation Insel Samoillow (rechts).

die alte Station, die zum Ust-Lenski Naturreservat gehörte. Wir alle arbeiteten in zwei kleinen Räumen, die als Labor ausgewiesen waren. Viele Jahre lang standen unsere zwei MBS-10 Stereomikroskope und zahlreiche Flaschen mit Proben in der Ecke eines dieser Räume. Dieser war unser hydrobiologisches Labor, in dem wir den Großteil unserer Arbeitszeit damit verbrachten, Zooplankton-Proben aufzubereiten (Abbildung 1).

Letztlich fanden wir im Laufe der 18 Jahre (2000-2017) unserer Monitoring-Untersuchungen Organismen von 120 Planktonspezies in den verschiedenen Gewässern von Samoilow. Mehr als 20 davon sind neue Spezies für die Fauna von Nordjakutien. Einige wurden erstmals in der paläoarktischen Region festgestellt und waren zuvor lediglich aus Alaska oder Nordkanada bekannt. Dies bestätigt den gemeinsamen Ursprung und die Verwandtschaft der Fauna dieser arktischen Regionen.

Erhöhter Oberflächenabfluss und höhere saisonale Schwankungen der Wasserstände in großen arktischen Flüssen aufgrund von Klimaerwärmung wurden in den vergangenen Jahrzehnten aufgezeichnet. Unter diesen Bedingungen hat der Fluss Lena weitreichenden Einfluss auf die Reservoirs in den Überschwemmungsgebieten seines enormen Wassereinzugsgebiets und trägt so zu einer aktiven Umsiedlung der Fauna aus nördlichen gemäßigten Breiten bei. Dies trägt zu Veränderungen im Verteilungsgebiet einer Anzahl von Arten bei und beeinflusst die Biodiversität sowohl auf lokaler als auch regionaler Ebene. In Jahren mit äußerst hohen Springfluten war die Ausbreitung von Spezies, die für die Region untypisch sind, katastrophal.

Eine Masseninvasion von bestimmten Arten, zum Beispiel *Holopedium gibberum* Zaddach, 1855 (Abbildung 2), kann eine rapide Umstrukturierung der Lebensgemeinschaften in Seen verursachen und deren ökologisches Gleichgewicht stören, was zu parasitischen Tierseuchen unter wirbellosen Wasserlebewesen führt. Trotz der jährlichen Einflussnahme des Flusswassers sind Tundrareservoirs relativ resistent gegen die Einführung neuer Arten. Organismen aus gemäßigten Breiten haben Schwierigkeiten, sich an die niedrigeren Wassertemperaturen, die Nahrungskonkurrenz durch einheimische Fauna und die Bedrohung durch Räuber anzupassen. Ein Großteil der Eindringlinge stirbt nach dem ersten Winter, aber die, die überleben, breiten sich allmählich in die nahegelegenen Tundragewässer aus.



Im Rahmen der russisch-deutschen Expeditionen ins Lenadelta fand auch insbesondere die Erforschung moderner Süßwasser-Muschelkrebse auf Samoillow Beachtung. Diese kleinen Krustentiere sind zahlreich in den unteren Lebensgemeinschaften der Tundraseen und -tümpel vorhanden. Schalen dieser wirbellosen Lebewesen können lange in den Sedimenten verbleiben und werden für paläoklimatische Rekonstruktionen genutzt.

Mit der Eröffnung der modernen Forschungsstation Insel Samoillow ergaben verschiedene Jahreszeiten neue Möglichkeiten für Feldforschung und experimentelle Forschung. Moderne Mikroskope von Olympus mit Digitalkameras ermöglichen nun detailliertere taxonomische Analysen verschiedener Gruppen von Organismen. Einige von ihnen können in der Polarnacht unter Eisdecken von etwa 2 m existieren und sich fortpflanzen. Die Menge an Winter-Zooplankton in einigen Seen ist vergleichbar mit der Zahl an Plankton im Sommer. Andere wirbellose Lebewesen frieren im Eis oder in Sedimenten von vollständig gefrierenden flachen Teichen ein, erhalten ihre Lebensfähigkeit 8-10 Monate lang, und gehen umgehend in einen aktiven Zustand über, sobald flüssiges Wasser auftritt. Alle Lebewesen streben danach, den kurzen Polarsommer zu nutzen um eine neue Generation hervorzubringen, die den nächsten rauen, arktischen Winter überlebt. Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den deutschen Wissenschaftlern unter der

Abbildung 2: Weiblicher *Holopedium gibberum* mit Eiern in der Brutkammer (A), Gesamtansicht der mit einem parasitären Pilz infizierten Population (B), totes Exemplar (C).





Leitung von Julia Boike (AWI, Potsdam) ermöglicht es uns, das ganze Jahr über Informationen zu Variationen verschiedener Parameter des aquatischen Lebensraums zu erhalten. Dies ist wichtig für die Analyse biologischer Prozesse in Ökosystemen des Wassers.

Trotz der komfortablen Lebens- und Arbeitsbedingungen auf der neuen Station ist es nach wie vor angenehm, abends in einem gemütlichen alten Holzhaus zusammenzukommen, gemeinsam am Tisch zu sitzen und sich daran zu erinnern, wie alles begann (Abbildung 3). An wie viele verschiedene interessante Menschen und Ereignisse erinnern sich die Wände dieses Hauses wohl? Es war eine wunderbare Zeit. Vielen Dank an alle für all die wunderbaren Expeditionen, für Eure Hilfe und für viele Jahre erfolgreicher Zusammenarbeit.

*Ekaterina N. Abramova, Irina I. Vishnyakova, Grigory A. Soloviev,  
Anna A. Abramova*

Abbildung 3: Gemütliches Beisammensitzen am Küchentisch der alten Samoilow-Station (von links: Fedor Sellyakhov, Stationsleiter der neuen Station; Molo (Günter) Stoof, „Hausmeister“ der alten Station; Ekaterina Abramova. (Foto: H.-W. Hubberten)



Mittagspause vor einem Eiskeil auf der Insel  
Muostakh, 2012. (Foto: V. Kochan, RBB)

4.

Umsetzung neuer  
Forschungsthemen  
2007-2012





## Die Dynamik der arktischen Küsten

Permafrostküsten in der ostsibirischen Arktis sind anfällig für eine Vielzahl an sich ändernden Umweltfaktoren. Alle weisen auf erhöhte Küstenerosionsraten und Massenverlagerungen von Sedimenten und Kohlenstoff in Richtung der flachen Schelfmeere der Arktis hin. Lockere, nur von Permafrost fixierte Sedimente machen 65 % der Küstenlinie des Arktischen Ozeans aus. An über 25 % der 7500 km langen Küstenlinie in der Region der Laptevsee grenzen steile Klippen an sumpfige, küstennahe Tiefländer der Tundra an, die aus syngenetischen, kontinentalen Permafrostsequenzen des Eiskomplexes aus dem späten Pleistozän bestehen. Die enorme räumliche Verteilung von extrem eisreichem Permafrost ist eine spezielle geologische Eigenschaft von Küsten im östlichen Teil der russischen Arktis, wo Küstenlinien mit einer Durchschnittsrate von  $-1,9 \text{ m a}^{-1}$  zurückweichen. Die Menge an von den Küsten in die Laptevsee freigesetzten Sedimenten liegt mindestens in derselben Größenordnung wie die Menge des Eintrags durch die Flüsse. Dies unterstreicht die Bedeutung der Küstenerosionsprozesse und die Notwendigkeit verbesserter Berechnungen.

Abbildung 1: Yedoma-Eiskomplex, 30m hohe Küstenklippe am Kap Mamontov Klyk. (Foto: Hubberten, 2008)



Die derzeit beobachteten schnellen Veränderungen des Meereisregimes und der Lufttemperaturen im Sommer haben das Potenzial, die Küstendynamik in der Region grundlegend zu verändern, was sich bereits an einer beschleunigten Küstenerosion zeigt. Angesichts der kalten Bodentemperaturen in der Region ist Küstenerosion der derzeit bedeutendste geomorphologische Prozess, der tiefliegende Kohlenstoffspeicher mobilisieren kann. Das Arctic Coastal Dynamics-Projekt (ACD) des International Arctic Science Committee stellte sich der Herausforderung, eine erste Schätzung der Kohlenstofffreisetzung an Küsten der zirkumpolaren marinen Ökosysteme abzugeben. In diesem Rahmen war es ein Hauptziel einer Reihe von fast 20 gemeinsamen russisch-deutschen Expeditionen zu den Küsten der westlichen, zentralen und östlichen Regionen der Laptewsee, ein Inventar von erodierenden Küstensegmenten anzulegen und Methoden zur Überwachung der Küstenerosionsrate zu einführen. Ein spezieller Fokus lag dabei auf der zusätzlichen Kartierung der direkt an der Erdoberfläche liegenden Küstenprofile während Schiffsexpeditionen in die westliche Laptewsee an Bord des Forschungsschiffs „Sofron Danilov“ im Jahr 2000 und entlang der Dmitri-Laptew-Straße und im Bereich der Neusibirischen Inseln an Bord des Forschungsschiffs „Pavel Bashmakov“ im Jahr 2002. Die großen Schiffe dienten als Basislager und man erreichte die Küsten mit kleinen Booten, um die Küstenerosion eingehend zu untersuchen.

Abbildung 2: M. N. Grigoriev und H.-W. Hubberten messen die Küstenerosion in der Dmitri-Laptew-Straße (2002).



Die Beobachtung des Küstenrückgangs wird normalerweise über Beobachtungen von Positionen der Küstenlinie zu verschiedenen Zeitpunkten festgestellt, entweder basierend auf wiederholten Messungen vor Ort oder anhand von Fernerkundungsdaten. Da die untersuchte Region so abgelegen und so groß ist, wurden Beobachtungen vor Ort hauptsächlich auf einzelne, wichtige Untersuchungsgebiete beschränkt. In diesen Gebieten wurden die oben erwähnten Feldkampagnen zur topographischen Erkundung des Geländes durchgeführt. Sie umfassten die Gegenden um Kap Mamontov Klyk, Kap Terpyai Tumus, Barriere-Inseln im Westen des Lenadeltas, die Bykowski-Halbinsel, und die Insel Muostach. Es wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um die räumliche Variabilität der Küstenregime zu erfassen und grundlegende Langzeit-Datensätze zu erstellen. Eine geplante Expedition kam im Jahr 2011, einem Jahr mit sehr frühem Eisrückgang im Frühjahr, plötzlich zum Erliegen, als ein neugieriger Eisbär die laufenden Feldarbeiten am Kap Mamontov Klyk behinderte. Das Expeditionsteam, bestehend aus sieben russischen und deutschen Wissenschaftlern, änderte umgehend seine Pläne und setzte stattdessen die Forschungsarbeiten auf Muostach fort. Dort intensivierte man die Untersuchung von Abbauprozessen des submarinen Permafrosts und der Dynamik der Küstenerosion an diesem für die Erforschung von Land-Meer-Wechselwirkungen in der Arktis wichtigen Standort.

Stationäre Langzeit-Beobachtungen von Küstenerosion in der Laptewsee werden generell nur an zwei Standorten durchgeführt: Mamontovy Khayata auf der Bykowski-Halbinsel und auf Muostach. Basierend auf diesen einzigartigen Zeitreihen, ist Muostach berühmt für sehr hohe Erosionsraten: Am nördlichen Ende der Insel beispielsweise gab es einen Rückgang von 39 m zwischen wiederhol-

Abbildung 3: Übernachtung während einer Nebenexpedition zum nördlichen Kap der Buor-Chaja-Halbinsel. (Foto: F. Günther, 2010)

Abbildung 4: Anlandung in der Nähe des nördlichen Kaps der Buor-Chaja-Halbinsel. (Foto: F. Günther, 2010)

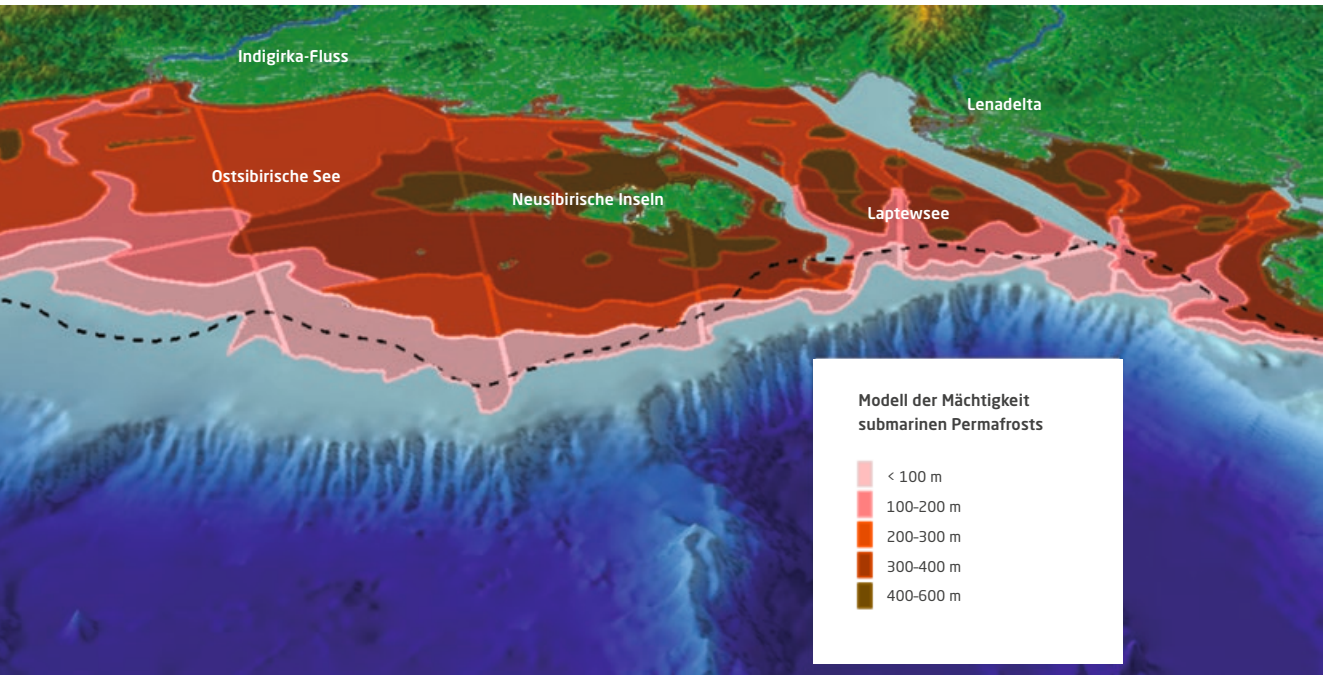


ten Felduntersuchungen 2011 und 2012. Verschiedene Studien auf regionaler Skala machten sich Archive von historischen Satelliten- und Luftaufnahmen zunutze, die von den 1950er bis zu den 1960er Jahren in der Region aufgenommen worden waren und verglichen die Veränderungen der Küstenpositionen mit modernen, hochauflösenden Satellitendaten. Die Ergebnisse zeigten, dass die jüngsten Erosionsraten fast doppelt so hoch waren wie die langfristigen Durchschnittsraten entlang der gesamten Festlandküste der Laptewsee und auf Muostach.

Die Küstenerosionsraten in der Arktis sind sowohl räumlich als auch zeitlich äußerst variabel. Eine Analyse von Wellen und Stürmen zeigte, dass diese die stärksten Einflussfaktoren auf Küstenerosion in der Arktis sind. Vor diesem Hintergrund wird der anhaltende Meereisrückgang nicht nur zu einer Erwärmung des Meerwassers und einem weiteren Anstieg der thermischen Komponente des Meeresspiegelanstiegs führen, sondern letztlich auch zu einer verstärkten Wellenwirkung, die zu einer weiteren Beschleunigung der Küstenerosionsraten führen könnte. Unsere Langzeit-Erforschung der Küste umfasste ein breites Spektrum an wichtigen Standorten und verschiedenen Küstentypen. Sie resultierten in Konzepten und Erkenntnissen bezüglich vorherrschender Küstenerosionsprozesse und -größenordnungen, die nicht nur wertvolle Erkenntnisse der Prozesse für andere arktische Regionen mit ähnlichen geologischen Eigenschaften liefern; viele können auch für die regionale Umweltplanung und Prozesse der Infrastrukturentwicklung eingesetzt werden.

*Frank Günther, Mikhail N. Grigoriev, P. Paul Overduin, Hugues Lantuit, Hans-Wolfgang Hubberten*

Abbildung 5: 21 m hohe Nordostklippe auf Muostach. (Foto: Grigoriev, 2012)



## Feldarbeit und Erstellung numerischer Modelle von submarinem Permafrost und Gashydraten

Submariner Permafrost ist Bodenmaterial, das unterhalb des Meeres liegt und an mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren eine Temperatur von unter  $0^{\circ}\text{C}$  aufweist. Im Gegensatz zu terrestrischem Permafrost wird dessen Temperatur im oberen Bereich durch Interaktionen der Sedimentoberfläche mit der Meerwassersäule statt durch Land-Atmosphären-Austauschprozesse bestimmt. Arktischer submariner Permafrost ist normalerweise ein Überbleibsel von terrestrischem Permafrost, der sich bis zum Ende des letzten glazialen Maximums, als der Meeresspiegel 125 m niedriger war, gebildet hatte. Vor diesem Zeitpunkt waren hunderte Kilometer des heutigen Schelfs extrem kalter Luft ausgesetzt, was zur Bildung von mehrere hundert Meter dickem Permafrost führte. Durch den Meeresspiegelanstieg am Ende des letzten glazialen Maximums wurde der Permafrost von Meerwasser überflutet und taut derzeit unter dem Einfluss des darüberliegenden Schelfmeeres. Mehr als 80 % des potenziellen submarinen Permafrosts

Abbildung 1: Blick nach Süden vom Arktischen Ozean in Richtung der Ostsibirischen See und der Laptewsee. Zu sehen sind Topographie und Bathymetrie, überlagert von Regionen der berechneten Dicke des submarinen Permafrosts, basierend auf Modellen von Romanovskii et al. (2005). Die schwarze gestrichelte Linie zeigt die Ausdehnung des submarinen Permafrosts, laut einer Karte der Permafrostverteilung in dieser Region von der International Permafrost Association.



befindet sich unter dem Ostsibirischen Schelf, für das nur wenige Beobachtungsdaten vorliegen.

Die Idee, die Zusammensetzung und Degradation submarinen Permafrosts zu untersuchen faszinierte die Wissenschaftler, die an der frühen Zusammenarbeit zwischen dem AWI und russischen Experten beteiligt waren. Es begann eine erfolgreiche Zusammenarbeit, hauptsächlich vorangetrieben durch die aktive Beteiligung von Nikolai N. Romanovskii von der Staatlichen Universität Moskau, die zu zahlreichen hochrangigen Veröffentlichungen führte (Abbildung 3). Nikolai verbrachte in den 1990er Jahren fast jeden Sommer mehrere Wochen als Gastwissenschaftler in Potsdam und wurde oft von Studenten und Mitarbeitern aus Moskau begleitet. Tag für Tag führten konstruktive Diskussionen zur Entwicklung neuer Ideen und Konzepte bezüglich der Bildung, Stabilität und Degradation von submarinem Permafrosts. Diese Ideen und Erkenntnisse wurden anschließend mittels numerischer Modelle quantifiziert und getestet. Nikolai genoss das entspannte akademische Leben in Potsdam, indem er vom Gästehaus auf dem Telegrafenberg durch den Babelsberg Park joggte oder in der Havel schwamm. Er kam immer voller Energie und neuer Ideen am Institut an.

Modellberechnungen haben gezeigt, dass submariner Permafrost sich durch Wärmetransfer und möglicherweise auch Salzdifffusion sowohl von oben als auch von unten auftaut. Die Berechnungen legen nahe, dass der Permafrost auf den sibirischen Schelfen seit mindestens 400.000 Jahren besteht (Abbildung 1).

Nach der Veröffentlichung einiger Artikel über die Stabilität und Degradation des submarinen Permafrosts verlagerte sich der Fokus der Zusammenarbeit zur Frage hin, ob es Methan in Form von Gashydraten in oder unterhalb des submarinen Permafrosts gibt. Diese Frage wurde zum nächsten Thema der gemeinsamen Modellbildungs-Experimente. Zirkumarktischer submariner Permafrost ist sowohl ein Reservoir als auch eine Begrenzungsschicht von Treibhausgasen, ob nun in gelöster, freier oder Hydratform. Eine große Menge an Gasen, die möglicherweise im Permafrost enthalten und davon begrenzt werden, bedeutet, dass sich erwärmender Permafrost unter dem Meer große Mengen an Treibhausgasen in einem kurzen klimatischen Zeitraum in die Atmosphäre freisetzen könnte. Die Zone, in der Gashydrate stabil sind, steht mit kaltem submarinem Permafrost in Verbindung, sodass ein Auftauen an submarinen Permafrost eine Freisetzung von Gashydraten bedeuten kann.

Deutsch-russische Bestrebungen, unser Verständnis des Übergangs von terrestrischem zu submarinem Permafrost, beispielsweise während des Rückgangs der



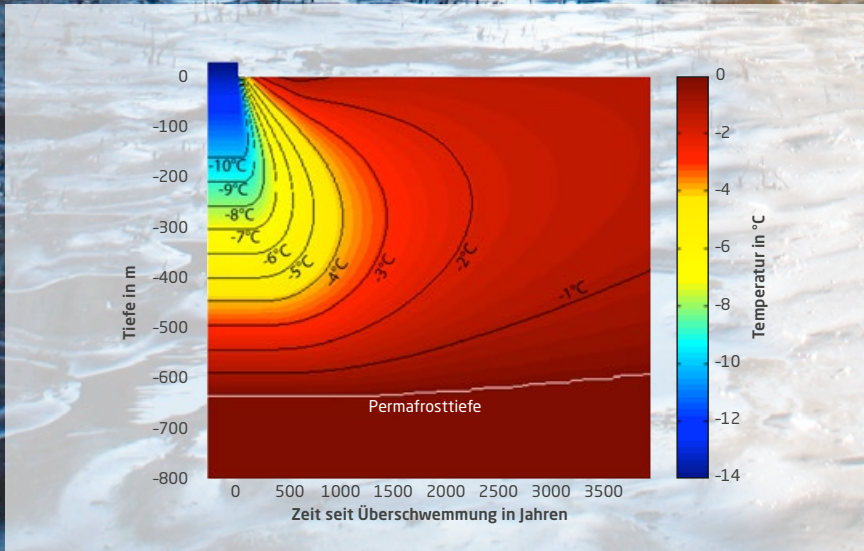
Küstenlinie oder als Ergebnis mariner Transgression sowie unser Verständnis der Permafrostverteilung auf dem sibirischen Schelf zu verbessern, führten zur Konzeption, Planung und Ausführung der COAST 2005 Bohrkampagne (siehe Seiten 68-70) sowie nachfolgenden und laufenden Bohrexpeditionen (Abbildung 2).

Das Vorkommen von submarinem Permafrost in flachen Gewässern konnte mithilfe einer Reihe von Bohrungen nachgewiesen werden. Dies bestätigte Ergebnisse, die N. F. Grigoriev, Vater des Co-Autors Mikhail N. Grigoriev, in den 1950ern und 1960ern erhalten hatte. Temperaturmessungen zeigten die rasche Erwärmung, die die Überschwemmung von Land mit sich bringt, was durch Modellberechnungen der Wärmeflüsse im Sediment bestätigt wird (Abbildung 4). Die Sedimentkerne ermöglichten eine Rekonstruktion der Landschaft und der Umwelt vor der letzten Vereisung.

Probleme mit Genehmigungen verhinderten viele Jahre lang Offshore-Bohrungen, aber man fand Alternativen wie Probennahmen und geophysikalische Forschungsarbeiten in Küstennähe. Diese Arbeiten umfassten Messungen der benthischen Temperatur und Salinitätsregimes in der zentralen Laptewsee sowie seit 2008 geophysikalische Methoden (seismisch und geoelektrisch) für die Erkennung gefrorenen Sediments. Viel Arbeit wurde den Erkennungsmethoden gewidmet, inklusive dem Testen von verbesserten geoelektrischen Geräten und der Entwicklung eines passiven seismischen Sensors, der die Dicke der ungefrorenen Sedimentschicht über dem gefrorenen Permafrost messen sollte. Dies wurde 2013 und später entlang des nördlichen Endes der Insel Muostakh getestet.

Abbildung 2: Bohrergerät auf dem Meereis auf der Westseite der Buor-Chaja-Halbinsel 2012. Bohrungen erreichten an dieser Stelle Tiefen von 52 m unter dem Meeresboden. Der entnommene Sedimentkern zeigte, dass der Permafrost in 25 m Tiefe unter dem Meeresboden beim Auftauen Methan freisetzte.

Abbildung 3: Nikolai N. Romanovskii zusammen mit Hans-W. Hubberten und IPA-Präsident Hugh French in Nikolais Wohnung in Puschtschino.

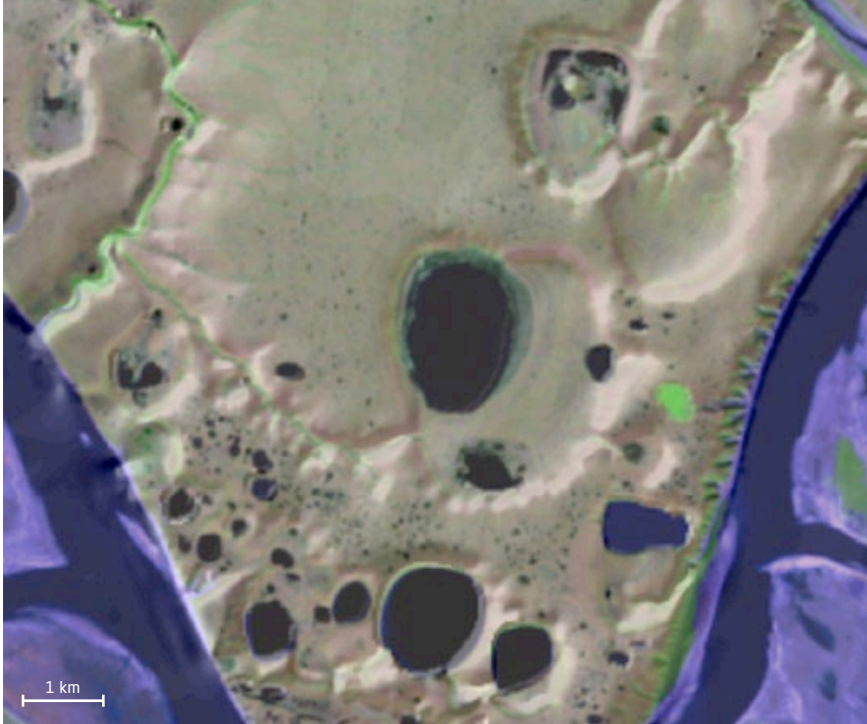


Weitere Forschung ist erforderlich, speziell bezüglich der Relevanz von sub-marinem Permafrost für moderne Beobachtungen von Methanemissionen aus dem Meeresboden der sibirischen Schelfmeere. Es konnte nachgewiesen werden, dass Teile des Lenadeltas, der pro-deltaischen Region und der zentralen Laptewsee mit Methan übersättigt sind. Beobachtungen des hohen Methan-gehalts in der Wassersäule der Laptewsee und innerhalb des Lenadeltas lassen tiefliegende und durchgehende Quellen und Bahnen vermuten, die möglicher-weise - oder auch nicht - durch Permafrost eingeschränkt werden. Gemeinsame, russisch-deutsche Bohrprojekte im Jahr 2012 in der zentralen Laptewsee zeigten auf, dass Methan aus dem Permafrost freigesetzt wurde, aber in solch kleinen Mengen, dass diese direkt bei der Freisetzung von Bakterien aufgenommen wurden.

Permafrost an der Küste und auf dem Schelf bleibt ein zentrales Forschungsobjekt der deutsch-russischen Zusammenarbeit, unter anderem mit dem Melnikov Permafrost Institut in Jakutsk und dem Trofimuk-Institut für Erdöl- Gas-Geologie und Geophysik in Nowosibirsk. Diese Zusammenarbeit wird durch das Ministeri-alkomitee für Bilaterale Wissenschaftlich-Technische Kooperation unterstützt. Gemessen an den derzeitigen Veränderungen des Klimas in der Arktis muss diese Komponente des Klimasystems umfassender verstanden werden.

*Hans-Wolfgang Hubberten, Pier Paul Overduin, Sebastian Wetterich,  
Mikhail N. Grigoriev*

Abbildung 4: Numerische Modellberechnungen zeigen die Erwärmung des Permafrosts nach seiner Überschwemmung. Unter Verwendung der Sediment- und Permafrosteigenschaften, die in den Sedimentkernen vorlagen, welche man während der COAST 2005 Expedition entnahm, können wir solche Modelle mit Beobachtungen abgleichen und so ein gesteigertes Verständnis der Funktion von submarinem Permafrost als Kontrollfaktor bei der Treibhausgasfreisetzung erlangen (Abbildung zur Verfügung gestellt von Fabian Kneier, 2018). (Hintergrundfoto: Torsten Sachs)



## Permafrostdegradation, Thermokarst und Thermoerosion - Feldforschung auf der Insel Kurungnach

Im Sommer 2008 begann eine Gruppe von sechs jungen Wissenschaftlern mit eingehenden Untersuchungen der Permafrostdegradation auf Kurungnach. Die Diplomanden und Doktoranden aus Hamburg und Potsdam richteten ein Feldlager auf dem schmalen sandigen Ostufer der Insel ein, direkt vor der beeindruckenden Eiskomplex-Klippe am Ausgang eines steilen, von Thermoerosion geprägten Tals. Die Wissenschaftler wählten den Standort, um nahe bei ihren Forschungsobjekten zu sein – große Thermokarstbecken, die sich tief in den eisreichen Permafrost Kurungnachs eingesenkt haben. Warum entschieden sie sich für einen Lagerplatz, der eine halbstündige Bootsfahrt entfernt lag, statt in der gemütlichen Forschungsstation Insel Samoillow zu bleiben? Weder wollten sie den kontrollierenden Augen der sehr skeptischen Senior-Techniker entgehen, die in der Station verweilten, noch die Erfahrung eines besonders romantischen und abenteuerlichen arktischen Lebens verpassen – sondern der Permafrost auf Kurungnach ist ganz anders als der Permafrost auf Samoillow. Während Samoillow zum aktiven Deltabereich mit Permafrostablagerungen aus dem Holozän gehört, ist Kurungnach ein Überbleibsel einer Akkumulationsfläche, die sich während des späten Pleistozäns bildete und Eiskomplex-Ablagerungen auf fluvialen Sanden des Paläo-Lena-Flusses enthält. Eiskomplex-Ablagerungen sind sehr eisreiche, bis zu dutzende Meter dicke Permafrostablagerungen. Sie sind in der Arktis weit verbreitet und erlangten große Aufmerksamkeit, weil sie bei klimatischer Erwärmung tauanfällig sind. Degradationsprozesse haben diese pleistozänen

Abbildung 1: Relief der Insel Kurungnach mit charakteristischen Landformen der Permafrostdegradation: Thermokarstseen und -becken und Thermoerosionstäler (Landsat-7 ETM+, RGB 4-5-3, über geschummertem DHM-Relief).



Ablagerungen durch das Holozän hinweg geprägt. Schnelles Permafrosttauen unter Seewasser (Thermokarst) hat Thermokarst-Seen gebildet; wenn diese Seen entwässern, können die zurückbleibenden Thermokarstbecken mehrere Kilometer breit und bis zu zwanzig Meter tief sein. Schnelles Permafrosttauen aufgrund von fließendem Wasser (Thermoerosion) hat Rinnen, Täler und Netzwerke aus Tälern geschaffen, die auch tief in die Insel einschneiden. All diese Landformen spielen eine wichtige Rolle für die Hydrologie, die Energiebilanz und den Kohlenstoffkreislauf der Landschaft. Die Frage ist: Wie werden sie sich in Zukunft entwickeln?

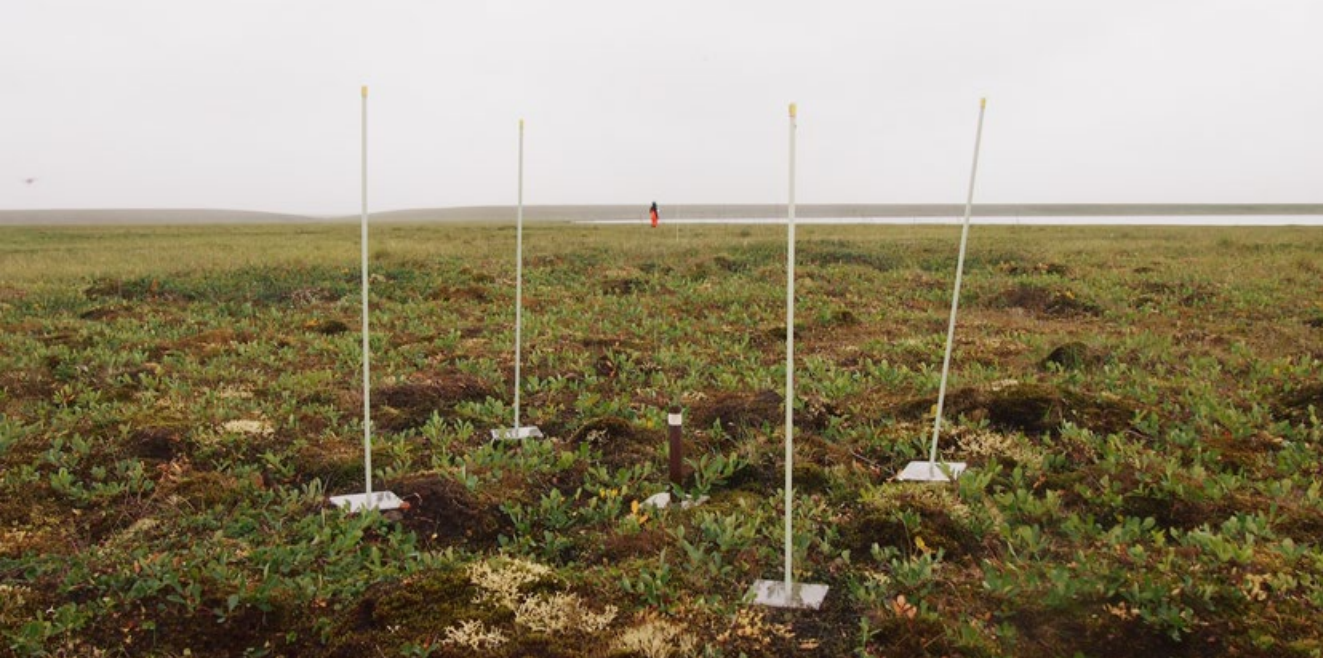
Die sechs jungen Wissenschaftler begannen, die Morphometrie und die Evolution exemplarischer Thermokarstseen und -becken auf Kurungnach sehr eingehend zu untersuchen. Das Hin- und Herschleppen der Ausrüstung, um umfassende geodätische und bathymetrische Messungen in einem ganzen, drei Kilometer breiten Thermokarst-Becken und den darin liegenden Seen durchzuführen, zahlte sich aus: Letztlich resultierten diese Bemühungen in wertvollen Geodatensätzen, die mit Messungen vor Ort wie der Strahlung, der Mächtigkeit der Auftauschicht, Vegetationsgemeinschaften, und sedimentologischen Proben kombiniert werden konnten. Die Forscher waren besonders erfreut über die Unterstützung russischer Wissenschaftler, die von Samoillow übersetzten, um zu sehen, ob es der Gruppe gut ging und ihren Vorrat an frischem Fleisch und Fisch zu teilen - eine willkommene Abwechslung zu den Mahlzeiten im Lager. Die

Abbildung 2: Tacheometrische Messungen erfordern zwei unterschiedliche Aufgaben: das Bedienen des Instruments und das Rennen über die Tundra mit einem Reflektorspiegel. Während Letzteres beim Aufwärmen hilft, frieren dem Bedienenden die Finger fast ab.



Besucher entdeckten auch sich überlagernde wissenschaftliche Interessen und beteiligten sich an gemeinsamen Probennahmen und Messungen. Zurück an den Instituten, kombinierten die Forscher die Felddaten mit Analysen von Satellitenbildern und Digitalen Höhenmodellen (DHM), um das Detailwissen des untersuchten Standortes auf größere Regionen zu übertragen und ein Prozessverständnis auf Landschaftsmaßstab abzuleiten. Beispielsweise fanden sie heraus, dass nur ein Drittel der Insel Kurungnach die Bedingungen für die zukünftige Entstehung von Thermokarst- und Thermoerosionsformen bietet, da diese Prozesse bereits während des Holozäns einen Großteil der Fläche degradiert haben. Sich neu entwickelnde Landformen werden nicht die gleiche Größe wie die bereits existierenden holozänen Thermokarst-Landformen erreichen können. Es gibt einfach nicht genug Platz für solche großflächige Entwicklungen. Die existierenden Landformen variieren in ihrer Aktivität: Manche Thermokarst-Seen und durch Thermoerosion gebildete Täler breiten sich aus und erodieren die Eiskomplex-Ablagerungen aktiv, viele sind seit Jahrzehnten stabil und manche Seen sind geschrumpft oder drainiert, wodurch sich erneut Permafrost bilden kann. Diese Variation der Erosionsaktivität zeigt sich auch in unterschiedlichen hydrogeochemischen Zusammensetzungen des Wassers in Thermokarst-Seen und Wasserläufen von Thermoerosionstätern. Wasserproben von erodierenden Standorten haben höhere Konzentrationen an organischem Kohlenstoff als solche von stabilen Standorten. Die Lagerbewohner wurden Zeugen einer beeindruckenden Demonstration von Thermoerosion, als ein Schwall sehr trüben dunklen (= reich an organischen Sedimenten) Wassers plötzlich am Lager vorbei durch das nahegelegene Thermoerosionstal floss und einen beträchtlichen Teil des „Strandes“, auf

Abbildung 3: Mündung eines Thermoerosionstals in die Lena a) während und b) nach einem Flutwelle aus eisreichem Permafrost.



dem sich das Lager befand, in die Lena spülte. Dieser Schwall dauerte nur einige Minuten an; danach bildete sich der Wasserlauf wieder zu einem rieselnden Bach mit fast klarem Wasser zurück. Es stellte sich heraus, dass ein Teil des eisreichen Permafrosts im oberen Teil des Tals als Staudamm von talabwärts fließendem Wasser fungierte, sodass sich das Wasser sammelte. Nach einiger Zeit hatte das gesammelte Wasser die eisreiche Permafrost-Barriere allerdings aufgetaut, schoss talabwärts und erodierte das Tal dabei zusätzlich.

Fünf Jahre später wandelten neue, junge Wissenschaftler auf den Spuren der ersten Expedition und vertieften die Studien verschiedener Arten von Permafrostdegradation des Eiskomplex. Gleichförmige Permafrostdegradation findet durch flächendeckendes Schmelzen von Bodeneis statt. Diese Degradation ist für den Betrachter unsichtbar, da sie nicht zu einer merklichen Störung der Landschaft wie Thermokarsten oder Thermoerosion führt. Solch isotropische Degradation kann jedoch durch wiederholte Messungen der Oberflächenhöhe entdeckt werden. Um diese Messungen vornehmen zu können, wurden 2013-2014 mehrere Referenzstäbe auf Kurungnach installiert. Die Stäbe reichen bis zirka einen Meter unter der saisonalen Auftautiefe und dienen so als feste Nivellierungspunkte. Wiederholt maßen wir den Abstand zwischen der Bodenoberfläche und den Stabspitzen, um Höhenänderungen zu detektieren. Die Referenzstäbe befinden sich in größerer Entfernung zueinander, wodurch Messungen zu Fuß zu einer herausfordernden Aufgabe werden. Die jüngsten Messungen ergaben, dass der Eiskomplex innerhalb der letzten vier Jahre um durchschnittlich 9 cm abgesunken ist.

Abbildung 4: Referenzstäbe zur Messung von Änderungen der Oberflächenhöhe. Die Stäbe sind im Permafrost fixiert; die Scheiben bewegen sich nach oben und unten, wenn sich die Höhe der Tundraoberfläche ändert.



Eine schnellere Permafrostdegradation kann gefährliche Auswirkungen auf die Infrastruktur in der Arktis haben, was an den beeindruckenden Uferklippen auf Kurungnakh gut beobachtet werden kann. Forscher untersuchten, wie schnell eine Klippe erodiert, indem sie eine einzigartige Fernerkundungs-Zeitreihe zwischen 2015 und 2017 vom Synthetic Aperture Radar (SAR) des deutschen Terra-SAR-X-Satelliten verwendeten. Die Forscher richteten ein einfaches Messfeld auf der Klippe an der Küste Kurungnachs ein, um die Fernerkundungs-Analysen zu validieren. Die Studie zeigte, dass das obere Ende der Klippe sich die ganze Saison lang mit konstanter Geschwindigkeit zurückbildet und dass Niederschlag, neben Lufttemperatur, einen entscheidenden Einfluss auf die Erosion ausübt. Hydrochemische Analysen zeigen, dass die Schmelzwasserströme, die von diesen erodierenden Klippen abfließen, einen höheren Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen und eine höhere Konzentration an Mineralkomponenten haben und viel trüber sind als das Wasser in Thermoerosionstälern und in Thermokarst-Seen. Der sommerliche Abfluss dieser Schmelzwasserströme aus dem Eiskomplex ist jedoch vernachlässigbar im Vergleich zum Abfluss des Lena-Flussarms, in den die Ströme fließen. Die Schmelzwasserströme beeinflussen daher kaum die Zusammensetzung des Lena-Arms auf seinem Weg zum Arktischen Ozean.

Die Permafrost-Expertise der russischen und deutschen Kollegen, die seit den letzten zehn Jahren auf Kurungnakh arbeiten, wurde seit dem Beginn der Forschungsaktivitäten des IPGG im Lenadelta durch geophysikalische Messungen ergänzt. Diese Messungen liefern wertvolle Erkenntnisse über Strukturen

Abbildung 5: Messung von Klippenerosion auf Kurungnakh: Die Messeinrichtung wurde alle vier Stunden von einer Zeitraffer-Kamera fotografiert; die Messungen wurden mit Satellitenbeobachtungen verglichen und zeigten Erosion über die gesamte Saison.





unterhalb der Oberfläche sowie für das Prozessverständnis von Thermokarst und Thermoerosion im eisreichen Permafrost (siehe Seite 171-173).

Die Forschungsergebnisse, die auf der Feldarbeit auf Kurungnach basieren, sind nicht nur für ein besseres Verständnis des eisreichen Permafrosts in der Arktis bedeutend. Sie dienen auch als terrestrische „Feldvergleichs-Analogien“ für die Untersuchung der Permafrostdegradation auf unserem Nachbarplaneten Mars. Das große Thermokarst-Becken, das sich in den Eiskomplex-Ablagerungen auf Kurungnach gebildet hatte, wurde beispielsweise als irdisches Analogbeispiel für muschelförmige Vertiefungen in volatil-reichen Mantelablagerungen des Mars untersucht. Ergebnisse von Feldstudien, Sonnenstrahlungsmodelle und geomorphometrische Analysen legen auf Kurungnach eine laterale Thermokarstentwicklung und eine Seenmigration in Nordrichtung nahe. Diese Schlussfolgerung ist aufgrund steilerer Hangwinkel der südlichen Hänge ersichtlich. Sonneneinstrahlung und Oberflächentemperaturen sind entscheidende Faktoren, die die Stabilität und Steilheit der Thermokarsthänge direkt beeinflussen.

In direkter Analogie zu diesen Beobachtungen wurde die klimatisch kontrollierte laterale Entwicklung von muschelförmigen Senken auf dem Mars postuliert, die hauptsächlich in Äquatorrichtung an den steilen, den Polen zugewandten Hänge wirksam ist.

*Anne Morgenstern, Irina V. Fedorova, Antonina A. Chetverova, Frank Günther, Mathias Ulrich, Fabian Beermann, Sebastian Zubrzycki, Sofia A. Antonova, Samuel Stettner, Julia Boike*

Abbildung 6: Strahlungsmessungen an den Hängen eines Thermokarstbeckens auf Kurungnach. Die Ergebnisse wurden auch für Analogstudien der Thermokarste auf dem Mars verwendet.



## Mit Kettensäge zum Klimamodell - Eiskeile als Winterklima-Archive

Eiskeile sind weitverbreitete und landschaftsbildenden Merkmale von Permafrostlandschaften. Wie der Name suggeriert, sind sie oft keilförmig und an Fluss- oder Küsten-Kliffs sichtbar als große, beeindruckende Eisblöcke. Sie sind meist 2-3 m breit (erreichen aber bis zu 6 m) und setzen sich viele, manchmal dutzende Meter in den Boden fort, wo sie sich allmählich verschmälern. Sie entstehen durch Frostsprengungs-Prozesse: Abkühlung in den Wintermonaten sorgt für Kontraktion des Bodens und Bildung von Frostrissen, die sich im Frühjahr mit Schnee und Schmelzwasser füllen. Die sehr tiefen Bodentemperaturen von teilweise unter  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  sorgen dafür, dass das eindringende Schmelzwasser sofort gefriert und so eine Eisader entsteht. Dieser Prozess wiederholt sich Jahr für Jahr und es entsteht ein Eiskeil, der aus vielen kleinen, einzelnen, vertikalen Eisadern besteht. Die Eisadern weisen jeweils die individuelle chemische Signatur des Schnees des vergangenen Winters auf.

Permafrost, d.h. gefrorener Boden mit stark negativen Temperaturen, ist nötig, damit sich Eiskeile bilden können. Eiskeile sind somit Phänomene, die auf Permafrostbedingungen hinweisen. Dort, wo Eiskeile vorhanden sind, zeigen sich deutliche polygonale Muster von außergewöhnlicher Schönheit in der Landschaft. Von einem Hubschrauber oder Flugzeug aus betrachtet, ähneln sie Stadtplänen. Die polygonalen Muster weisen auf die Position der Eiskeile hin und zeigen, dass diese erstaunlichen Objekte einen landschaftsbildenden Einfluss haben, vor allem in den Regionen mit kontinuierlichem Permafrost. Wo Spuren früherer Eiskeile erkennbar sind, wissen wir, dass es in diesen Gebieten einst Permafrost gegeben hat. Sogenannte Eiskeil-Pseudomorphosen, d.h. mit Sedimenten verfüllte Hohlräume, die von ehemaligen, ausgetauten Eiskeilen hinterlassen wurden, sind auch aus den mittleren Breiten Europas bekannt, als stille Zeugen vergangener Permafrostlandschaften.

Eiskeile wurden seit Mitte der 1990er Jahre während zahlreicher Expeditionen unter Leitung oder mit Beteiligung des AWI und in enger russisch-deut-

Abbildung 1: Eiskeil-Klippe auf Muostach, 2012. (Foto: T. Opel)





scher Zusammenarbeit erforscht: die Untersuchungen begannen 1996 am Kap Sabler am Labazsee, wurden 1998 auf der Bykowski-Halbinsel und 1999 auf der Großen Ljachow-Insel fortgesetzt. Seit dieser Anfangsphase sind Eiskeile zu einem zentralen Forschungsobjekt geworden, vor allem für Paläoklimastudien und hydrologische Untersuchungen. Sie wurden mit Studien der Prozesse verknüpft, die für der Bildung von Eiskeilen relevant sind, z.B. dem Zeitpunkt der Frostrissbildung, der Bildung von Eisadern im Frühjahr und der Erhaltung eines Klimasignals im Grundeis.

Eiskeilstudien sind immer Teil der Forschung am Permafrost-Sediment, denn Eiskeil-Bildung steht oft in Verbindung mit der Permafrost-Aggradation. Die beeindruckendsten Exemplare sind in den sogenannten Eiskomplex-Ablagerungen zu sehen. Wenn man vor einer 25-30 m hohen Steilwand aus grauem Eis steht, die im Verlauf von zehntausenden von Jahren durch einzelne kleine Eisadern gebildet wurde, ist das ein magisches Moment, in dem man die Arktis ein wenig besser versteht. An diesen Steilwänden, die aus fast reinem Eis bestehen, ist es leicht nachzuvollziehen, dass Wissenschaftler zunächst dachten, diese seien durch Gletscher gebildet wurden.

In den ersten Jahren entnahmen die Forscher hunderte von Eiskeilproben mit Eisschrauben. Nach und nach wurde klar, dass bessere Proben des gefrorenen Materials im Originalzustand mithilfe von Kettensägen und Bohrern entnommen werden konnten. Durch die Nutzung von Gefriertruhen in den Feldlagern sowie Styroporboxen für den Transport konnte eine ununterbrochene Kühlkette eingerichtet werden. Dies ermöglichte eine präzise Beprobung des gefrorenen Eiskeils im Kältelabor in Deutschland, wo eingeschlossenes organisches Material entnommen und somit eine Radiokarbondatierung der jeweiligen Proben durchgeführt werden konnte. Beim organischen Material in den Eiskeilen handelte es sich um bis zu 30.000 Jahre alte, grünliche Blätter, in denen das Chlorophyll so-

Abbildung 2: Eiskeil-Polygone im westlichen Lenadelta. (Foto: H. Meyer)



gar nach solch einer langen Zeit noch erkennbar war. Es gab auch weniger frisch aussehende Pflanzenreste und Lemming-Kot, die eine präzise Altersbestimmung der jeweiligen Eisadern oder -keile ermöglichten - eine Voraussetzung für die Erstellung einer Zeitreihe zur Klimarekonstruktion.

Im Laufe der Jahre wurde deutlich, dass Eiskeile eine direkte Verbindung zur Atmosphäre haben, da sie von geschmolzenem Schnee gebildet werden. Dadurch zeichnen sie auf hervorragende Weise vergangene Klimaverhältnisse auf, insbesondere die der Wintersaison. Um die Eiskeile als Klima-Archive mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als tausend Jahren zu nutzen, waren zahlreiche Radiokarbon-Datierungen erforderlich. Darüber hinaus war ein wenig Glück nötig, um drei Forschungsstandorte zu identifizieren, die eine Rekonstruktion des Winterklimas für das Holozän und Spätpleistozän mit einer zeitlichen Auflösung von weniger als hundert Jahren ermöglichten: in Barrow, Alaska, im Lenadelta und an der sibirischen Oyogos-Yar-Küste. Das Verständnis der Veränderungen von Wintertemperaturen ist wichtig, weil die derzeitige Erwärmung in der Arktis im Winter am stärksten ist.

Eiskeile sind Klimaarchive der Wintersaison. Für das Lenadelta zeigen sie im Laufe der letzten 7.000 Jahre eine natürliche, graduelle Erwärmung bis zum heutigen Maximum auf, wie in einer hochrangigen Veröffentlichung dargelegt. Dies steht im Gegensatz zur langfristigen Abkühlung der Sommer im Holozän, die anhand der Untersuchung von anderen arktischen Stellvertreter-Datensätzen (z. B. Pollen) ersichtlich ist, bestätigt aber die Vorhersagen aus Klima-Modellsimulationen.

*Hanno Meyer, Thomas Opel, Alexander Yu. Dereviagin*

Abbildung 2: Probennahme aus einem Eiskeil des Pleistozäns auf der Bykowski-Halbinsel mittels Eisschrauben, 1998. (Foto: H. Meyer) Abbildung 3: Probennahme aus einem Eiskeil mittels Kettensäge. (Foto: L. Schirrmeyer)



## Veränderungen nordsibirischer Seen und Baumgrenzen in der Vergangenheit und Gegenwart als Reaktion auf Erwärmung

Das Klima in Nordsibirien hat sich in den letzten Jahren stark erwärmt. Als Folge daraus wird erwartet, dass sich boreale Nadelwälder nordwärts ausbreiten. Dies hätte den Verlust des einzigartigen Ökosystems der Tundra zur Folge, die derzeit nur einen schmalen Landstreifen nördlich der Taiga und südlich der Küste der sibirischen Arktis bedeckt.

Eine Ausbreitung borealer Nadelwälder würde auch Veränderungen der chemischen Eigenschaften und biologischen Zusammensetzung von Seen hervorrufen. Unser Wissen um die Veränderungen der Baumgrenze in Nordsibirien im Zuge der globalen Erwärmung beschränkt sich derzeit allerdings fast ausschließlich auf Simulationen, die auf globalen Vegetationsmodellen basieren. Im Gegensatz zu allen anderen die Arktis umgebenden Regionen bildet in Sibirien die Lärche (*Larix sp.*), ein laubabwerfender Nadelbaum, die Baumgrenze. Aufgrund dessen ist die Zuverlässigkeit der meisten ökologischen Modelle in dieser Region zweifelhaft. Lärchen haben einen sehr langen Lebenszyklus. Die Zeitverzögerung, mit der sie auf Temperaturerhöhungen reagieren, ist noch unbekannt. Das bedeutet, dass wir auch nicht wissen, wie lange der Effekt der derzeitigen Erwärmung auf ökologische Veränderungen in Zukunft andauern wird.

Unser Team aus russischen und deutschen (Paläo-)Ökologen forscht seit mehr als einem Jahrzehnt in der nordsibirischen Übergangszone von Taiga zu Tundra,

Abbildung 1: Die Expeditionsgruppen wandern oft mehrere Kilometer durch Tundra und Taiga zu den Standorten, an denen sie Vegetationsmessungen durchführen und Proben entnehmen wollen. (Foto: Stefan Kruse)



um die Populationsdynamiken von Lärchen als Reaktion auf Erwärmung und die ökologischen Konsequenzen für nördliche Seensysteme zu untersuchen. Unsere Forschung umfasste Feldarbeit in einigen Gebieten der sibirischen Baumgrenze entlang eines West-Ost-Transekts, der die südliche Taimyr-Halbinsel (2011 and 2013), die Anabar-Region (2007), die untere Flussregion der Lena (2009), die Region des Flusses Omoloi (2014), die untere Flussregion der Kolyma (2008, 2012) und Zentral-Tschukotka (2016) einschließt. Standorte, die Transekte vom Borealen Nadelwald zur Tundra umfassten, waren von besonderem Interesse. Die Standorte wurden per Hubschrauber erreicht, um Effekte von menschlichen Einwirkungen auf Vegetation und Seen zu minimieren.

Die Feldforschung umfasste Vegetationsanalysen inklusive Parzellenanalysen, tausende Messungen einzelner Bäume sowie das Sammeln von Baumkernen für dendrochronologische Analysen. Wir untersuchten außerdem Seen mittels (pa-läo-)limnologischer Methoden durch Messung der Seenparameter sowie Probenahmen von Wasser, Zoobenthos, Phytoplankton und Seesedimentkernen. Feldarbeit bedeutet, wochenlang in Zelten in einer rauen Umgebung zu leben. Die Tage waren voller harter Arbeit und faszinierender Momente, wie dem Ausladen von mehr als einer Tonne an Feldausrüstung aus einem Hubschrauber, der einen Meter über dem torfigen Boden schwebte oder den regelmäßigen Besuchen von Braunbären in unserem Lager in Tschukotka.

Unsere Felduntersuchungen unter anderem von Pflanzen, Diatomeen, Zuckmücken (nicht stechende Mücken) und Wasserflöhen (Cladocera), zeigten auf, dass sich die terrestrischen und aquatischen Ökosysteme der Tundra deutlich von Waldstandorten unterscheiden. Seesedimente sind Archive vergangener Veränderungen der Umwelt und können Aufschluss über zurückliegende Beziehungen zwischen der Entwicklung von Ökosystemen und Klima geben.

Abbildung 2: Sedimentkerne aus arktischen Seen sind natürliche Archive, in denen Bioindikatoren erhalten wurden. Deren Analyse ermöglicht eine Rekonstruktion der regionalen Vegetationsgeschichte und gibt Hinweise darauf, wie sich Umweltbedingungen im Laufe der Zeit verändert haben. (Foto: Evgeni Zakharov)

Abbildung 3: Lärchen können in Krummholzform wachsen, wenn Umweltbedingungen ungünstig sind, wie hier auf der südlichen Taimyr-Halbinsel in Nordsibirien zu sehen. (Foto: Stefan Kruse)

Wir untersuchten Mikrofossilien wie Pollen, Diatomeen und alte DNA in unserem „Joint German-Russian Laboratory for the Investigation of the Environmental Dynamics in the Terrestrial Arctic (Biological Monitoring-BioM)“. Unsere Forschungsergebnisse zeigten, dass die Vegetation (womöglich durch Klimawandel angetrieben) ein wichtigerer Treiber von Veränderungen in Seen ist, als der Klimawandel selbst.

Wir fanden überdies heraus, dass sich die Baumgrenze auf der Taimyr-Halbinsel während des mittleren Holozäns mehrere Kilometer weiter nördlich befand, obwohl das Klima ähnlich warm war wie heutzutage. Wir nehmen an, dass diese Diskrepanz zwischen der derzeitigen Position der Baumgrenze und dem derzeitigen Klima eine Folge der abrupten Erwärmung in der jüngsten Vergangenheit ist, die ein Ungleichgewicht zwischen Vegetation und Klima hervorgebracht hat.

Unsere Untersuchungen der Populationsdynamiken von Lärchen legen nahe, dass Lärchenwälder sich in den offenen Waldgebieten verdichten, aber nur langsam nach Norden vordringen. Um ein besseres mechanistisches Verständnis der Prozesse von Lärchenpopulationen zu erlangen, haben wir ein Vegetationsmodell erstellt, das den Lebenszyklus von Millionen von Bäumen und deren Interaktionen als Reaktion auf das Klima simuliert.

Die Simulationen legten nahe, dass die langsame Reaktion im Norden auf einer geringen Ausbreitung beruht, die ihrerseits durch eine Unfähigkeit weitläufiger Samenverteilung sowie eine geringe Samenqualität zu erklären ist. Obwohl die Baumgrenze sich nur langsam nach Norden verlagern wird, wird sich dieser Prozess noch über hunderte von Jahren fortsetzen, auch im unwahrscheinlichen Fall, dass die Erwärmung bald aufhört.

Dies wiederum wird wahrscheinlich einen unumkehrbaren Verlust der arktischen Biodiversität zur Folge haben. Darüber hinaus wird die Ausdehnung der Wälder durch die Rückkopplung zwischen Vegetation und Klima, basierend auf dem sich ändernden Rückstrahlungsvermögen der Oberfläche, eine zusätzliche Erwärmung zur Folge haben.

Eine Kombination aus feldbasierten (paläo-)ökologischen Studien, Fernerkundung und Vegetationsmodellen wird es uns in Zukunft ermöglichen, bessere Vorhersagen zu den Veränderungen der nordsibirischen Wälder und deren Relevanz für Biodiversität und Klima auf lokaler, regionaler und globaler Ebene zu treffen.

*Ulrike Herzs Schuh, Luidmila A. Pestryakova, Laura S. Epp, Larisa A. Frolova, Ruslan M. Gorodnichev, Birgit Heim, Florian Jeltsch, Juliane Klemm, Stefan Kruse, Larisa B. Nazarova, Bastian Niemeyer, Anatolii N. Nikolaev, Kathleen R. Stoof-Leichsenring, Ralph Tiedemann, Mareike Wiczoreck, Evgenij S. Zakharov, Heike H. Zimmermann*





## Kohlenstoff in Permafrost - Quantifizierung der Menge an organischem Material in Sibirien

Permafrost in Sibirien taut, und das auf verschiedene Weise. Besonders gut sichtbar sind Küstenerosion (Abbildung 1) und Bodenabsenkungen, oder wenn vorhandene Straßen, Häuser und andere Infrastruktur dadurch beschädigt wird. Doch auch eine Vertiefung der sommerlichen Auftauschicht und Entstehung von Seen, was zu schnellen Auftauprozessen (Thermokarst) führt, machen die Permafrostregion zu einer Region, in der der Klimawandel heute deutlich sichtbar wird.

Das Permafrosttauen hat neben den lokalen Auswirkungen wie Bodenabsenkung und Beschädigungen an Infrastruktur auch einen globalen Effekt, da es auch zu einer Rückkopplung mit dem globalen Klima kommen kann. Große Mengen an organischem Material sind in den mächtigen Permafrostböden eingefroren. Dieser Kohlenstoff, der aus abgestorbenen Pflanzen- und Tierresten besteht, ist seit Jahrtausenden durch Gefrorenis dem aktiven Kohlenstoffkreislauf entzogen. Durch das Auftauen des Permafrosts steht dieser Kohlenstoff dem aktiven Kohlenstoffkreislauf wieder zur Verfügung, bei dem mikrobielle Abbauprozesse zur Entstehung der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan führen. Dies wiederum erhöht die Menge an Treibhausgasen und beschleunigt die Erwärmung der Atmosphäre. So kommt es zu stärkerem Permafrost-Auftauen und mehr Kohlenstofffreisetzung - eine Rückkopplung, die sich selbst verstärkt. Unsere Forschungsfragen, wie viel und wie schnell Kohlenstoff aufgetaut und mobilisiert werden kann ist

Abbildung 1: Organikreiche Sedimentschichten, einschließlich Torfblöcken, die aus einer Yedoma-Klippe auf der Sobo-Sise-Insel im Lenadelta ragen. (Foto: M. Fuchs, 2014)



daher ein zentrales Thema um die Folgen von Permafrost-Tauen in der Arktis vorherzusagen. Unsere Forschung in den russisch-deutschen Lena-Expeditionen konzentriert sich daher auf die Eigenschaften, Entstehung, Verteilungen, Menge und Anfälligkeit von Kohlenstoff in der nordsibirischen Arktis.

Bis in die späten 90er Jahre wurde angenommen, dass das kalte arktische Klima zu einer niedrigen Produktivität der Vegetation führt. Diese Theorie war darauf begründet, dass die tiefen Temperaturen und kurze Vegetationsperiode zu einem relativ geringen Eintrag an Kohlenstoff in die arktischen Böden führt. Diese Ansicht hat sich jedoch durch unsere Forschung im Lenadelta seit den 2000er Jahren grundlegend verändert. Tatsächlich ist es so, dass durch eisige Temperaturen oder Wassersättigung der Abbau von organischen Stoffen verlangsamt oder gar verhindert wird. Hinzu kommt, dass Prozesse wie Kryoturbation (Frostdurchmischung) die organische Substanz schnell in die kalten tieferen Böden bringen können. Auch langfristige Sedimentation unter periglazialen Umweltbedingungen tragen dazu bei, dass der Kohlenstoff relativ schnell in den Permafrost eingelagert wird.

Im Rahmen der Lena-Expeditionen konnten wir auf Basis zahlreicher Felduntersuchungen neue Erkenntnisse zur tiefen Permafrost-Kohlenstoffspeicherung in Nordsibirien gewinnen. Wir haben organischen Kohlenstoff sowohl in alten Permafrostsedimenten in bis zu mehr als 50 Metern Tiefe untersucht als auch in der saisonal ungefrorenen Auftauschicht, in Eiskeilen und sogar in Methanblasen, die im See- und Meereis eingeschlossen sind (Abbildung 3). Wir fanden unter anderem eindrucksvolle Zeugen der Mega-Fauna der letzten Eiszeit, wie Mammutstoßzähne und -schädel, Wollnashornknochen und sogar die Haare eines Mammutfells. Eine der Herausforderungen für die Probenahme von organischem Kohlenstoff während der Sommerfeldarbeit besteht jedoch darin, den Kohlenstoff gefroren zu halten, um eine Zersetzung nach der Probenahme zu vermeiden. Trotz permanenten Frost im Untergrund mussten wir daher einen Gefrierschrank mit einem Hubschrauber ins Zeltlager bringen und auf den Permafrost stellen.

Abbildung 2: Landung mit einem MI-8 Helikopter an einem entlegenen Standort im Lenadelta und Beginn einer mehrwöchigen Expedition zur Entschlüsselung der Eigenschaften des organischen Kohlenstoffs im Delta. (Foto: J. Strauss, 2014)



Mit den einzigartigen Möglichkeiten der Lena-Expeditionen und der Analyse der Proben in unseren Laboren konnten wir Berechnungen für die Arktis aber auch speziell für das Lenadelta-Gebiet verbessern. So sind wichtige Datensätze für die Kohlenstoff-Abschätzungen in der panarktischen Permafrost-Zone entstanden, die heute auch ihren Eingang in Klimamodellen finden.

Wir wissen jetzt, dass das Einfrieren von organischem Material über einen Zeitraum von Tausenden von Jahren große Mengen Kohlenstoff im Lenadelta gespeichert und eingefroren hat. 240.000.000.000 kg Kohlenstoff sind bis zu einer Tiefe von 1 m eingelagert. Mit anderen Worten, dieses riesige Kohlenstoffinventar im ersten Meter des Lenadeltas entspricht so viel wie 29 Millionen Mal die Masse des riesigen MI-8 Helikopters (siehe Abbildung 2), der uns oft an entlegene Orte bringt, an denen wir Kohlenstoff und andere interessante Themen im Lenadelta studieren wollen. Doch das ist noch nicht alles an Kohlenstoff in der Region, denn auch unterhalb des oberen Meters des Bodens ist heute noch reichlich organische Substanz vorhanden, die in einer zukünftigen Erwärmung der Arktis anfällig für das Auftauen ist, da die Permafrostsedimente im Lenadelta bis zu 50 m mächtig sein können.

*Jens Strauss, Lutz Schirrmeister, Sebastian Zubrzycki, Alexander L. Kholodov, Mikhail N. Grigoriev, Viktor V. Kunitsky, Matthias Fuchs, Eva-Maria Pfeiffer, Guido Grosse*

Abbildung 3: Entnahme einer Methanprobe aus dem Eis der Bykowski-Halbinsel. (Foto: H. Zimmermann, 2017)





2005 wurden hydrologische Messungen entlang des Olenjokskaja-Kanals mit „Neptun“ durchgeführt. Diese Untersuchungen lieferten Daten zu Veränderungen des Wasserflusses und der Sedimentfracht entlang dieses Kanals vom Anfang des Deltas bis zur Flussbank des Olenjokskaja-Kanals.

Mehrere kleine Forschergruppen haben auf Booten hydrologische und geomorphologische Studien entlang der Kanäle und anderer Flüsse in der Küstenzone der Laptewsee durchgeführt. Zwei Expeditionsteilnehmer haben die Kanäle Sardachskaja, Tumatskaja, Bykowskaja, Arynskaja und Osochtoch zu verschiedenen Zeiten des Projekts durchfahren.

2006 nutzten zwei Wissenschaftler ein Schlauchboot, um den Fluss Urasalach zu erkunden, der durch das Prontschischtschew-Gebirge fließt. Der Fluss Kelimeer, ein Zufluss des unteren Olenjok wurde 2008 besucht und zum ersten Mal wurden Sedimente des Olenjok-Flussdeltas datiert.

Ein großer Knotenpunkt mehrerer Flussarme in der Nähe der Insel Sardach wurden während zwei Saisons 2001 und 2002 untersucht. Wasserfluss und Sedimentfracht wurden in vier hydrometrischen Bereichen der Kanäle Sardachskaja und Trofimowskaja gemessen. Diese Messungen wurden mit den in den 1970er



Jahren gemessenen hydrometrischen Charakteristika dieser Kanäle verglichen, die Hydrologen der Beobachtungsstation in Tiksi dokumentiert hatten. Dieser Vergleich zeigt, dass Wasserfluss und Sedimentfracht in südöstlicher Richtung vom Trofimowskaja-Kanal zu den Armen des Bykowskaja und Sardachskaja schwanken.

Geomorphologische Untersuchungen entlang dieser Kanäle lieferten Hinweise für die Ursache dieser Schwankung des Wasserflusses. Einerseits hatte eine tektonische Hebung eine Wölbung der Erdoberfläche im westlichen Teil des Deltas zur Folge. Diese Wölbung erzwingt einen Wasserfluss in südöstlicher Richtung. Andererseits wurden Teile des Eiskomplexes im südöstlichen Teil des Deltas vor einigen Jahrhunderten zerstört und eine Wasserstraße öffnete sich infolge des Gefälles der Erdoberfläche nach Osten hin.

Der Bykowskaja-Kanal ist mit lediglich 1500-2000 Jahren der jüngste Arm des Deltas. Die geologische Zusammensetzung und die Geomorphologie des Deltas wurden mit Booten und anderen Gefährten untersucht. Infolge dieser Forschung konnte eine geomorphologische Karte des Lenadeltas erstellt und die Evolution des Deltas während des Holozäns nun verstanden werden.

Die Konsequenz dieser Entwicklung ist eine Verlagerung der sich füllenden Mündungen von Westen nach Osten während Meeresspiegelschwankungen und des Verschwindens von Überbleibseln des Eiskomplexes aufgrund von Abrasions- und Erosionsprozessen. Alte Teile der ersten Terrasse befinden sich im westlichen und die jüngsten Inseln im östlichen Teil des Deltas.

Abbildung 3: Untersuchung der Küstenlinie auf der Insel Alchan an der Nordgrenze des Deltas

Die einzigartige geologische Zusammensetzung des Lenadeltas hat zur Folge dass die Inseln der ersten Terrasse aus organischen und mineralischen Sedimenten verschiedener Zeitalter bestehen aber eine einzige Oberfläche auf der ersten Terrasse bilden. Solche geologischen und geomorphologischen Eigenschaften weisen darauf hin, dass Meeresspiegelschwankungen nach wie vor eine wichtige Ursache für die Gestaltung des Deltas sind.

Bootsexpeditionen entlang der Flüsse Keliieemer und Olenjok mit Besuchen des Olenjok-Flussdeltas zeigen, dass letzteres analog zum Lenadelta ist und dass auch hier Meeresspiegelschwankungen sehr wichtig für die Gestaltung der Flussmündung des Olenjok sind. Wir folgten den Kanälen Tumatskaja und Osochtoch nördlich des Lenadeltas und richteten einen Untersuchungsstandort auf der Insel Alchan ein, um die nördlichen Küstendynamiken zu erforschen.

Während aller Bootsexpeditionen wurde die Untersuchung von Seen im Delta und im Küstengebiet der Laptewsee fortgesetzt. Das morphologische, hydrologische und hydrochemische Regime sowie die Seesedimente werden weiter erforscht. Aufwändige Untersuchungen des Sees Sewastian-Kjuele in der Nähe der Tiksi-Wetterstation halfen dabei, die Klimageschichte der letzten Jahrtausende in dieser Gegend zu verstehen. Eine Pilotstudie zur Untersuchung der Meeresspiegelschwankungen in den Lagunen der Buor-Chaja-Bucht begann 2017.

Von 2014-2017 wurde das Lenatal von Jakutsk bis zum Delta erforscht, um Prozesse zu untersuchen, die zuvor im Delta beobachtet worden waren. Der Fluss reagiert noch in tausend Kilometern Entfernung zum Delta auf Änderungen des Meeresspiegels. Dieser marine Einfluss ist in den Flussterrassen dokumentiert. Die Forschungsarbeiten wurden an Bord der „Merslotowed“ während Frachtbetriebs von Jakutsk zur Forschungsstation Insel Samoillow sowie auf anderen Bootsexpeditionen entlang des Lenatals durchgeführt.

Insgesamt lieferten die Expeditionen mit Booten einen reichen Datensatz zum Aufbau und der Geschichte des Lenadeltas und der Küstenzone der Laptewsee. Das Buch „Origination and Evolution of the Lena River Delta“ widmet sich allen paläoökologischen Fragen zum Delta und der Laptewsee-Region.

*Dmitry Yu. Bolshiyarov, Irina V. Fedorova, Julia Boike*



## Mobilisierung und Ablagerung von Kohlenstoff im Lena-Flusssystem

Die großen Flüsse der in russischen Arktis transportieren enorme Mengen an gelösten und partikelförmigen organischen Stoffen, inklusive Nährstoffen, zum Arktischen Ozean. Die organischen Stoffe stammen hauptsächlich aus den Böden und Permafrostablagerungen in den Einzugsgebieten der Flüsse. Auftauprozesse und eine fortschreitende Erwärmung haben daher wahrscheinlich einen Einfluss auf den Eintrag organischer Stoffe. Aufgrund von Abbauprozessen erwartet man, dass Änderungen von Zusammensetzung und Alter der organischen Stoffe nach dem Auftauen, bei der Mobilisierung und während des Transports in Flüssen stattfinden. Die Bodenarten sowie die lokalen hydrologischen Gegebenheiten bestimmen zusätzlich die Eigenschaften der organischen Stoffe.

In den Sommern 2009 und 2010 brachen wir zu Expeditionen zur Beprobung der verschiedenen Arme des Lenadeltas auf. Unser Ziel war es, die Flüsse der gelösten und partikelförmigen organischen Stoffe von ihren Ursprüngen in den lokalen Einzugsgebieten bis zu ihrer endgültigen Ablagerung in Sedimenten des Arktischen Ozeans nachzuverfolgen. Wir wollten auch den Kohlenstoffverlust aufgrund von Abbauprozessen beobachten. Während der ersten Expedition 2009

Abbildung 1: Binnenschiff „Putejski 405“ am Strand der Insel Samoilow. (Foto: G. Mollenhauer)





sammelten wir Wasser- und Sedimentproben aus den Hauptarmen des Deltas: den Kanälen Bykowskaja, Trofimovskaya, Sardachskaja und Olenjokskaya. Zu diesem Zweck charterten wir das Binnenschiff „Putejski 405“ (Abbildung 1). Wir, eine Gruppe bestehend aus sechs deutschen und einem russischen Wissenschaftler, verladen einige Kisten mit Laborausrüstung und gingen in Tiksi an Bord. Unsere erste Aufgabe war es, ein behelfsmäßiges Labor in einer der zwei Kabinen auf dem Schiff einzurichten (Abbildung 2).

Die erste Strecke unserer Flussreise führte uns in den frühen Morgenstunden zur Insel Samoillow. Wir mussten den leitenden Wissenschaftler der Station wecken und uns wurde ein warmer Empfang in der gemütlichen Küche bereitet. Im Laufe der nächsten 10 Tage reisten wir durch das Delta und arbeiteten an über 30 Stationen in den Hauptarmen des Lenadeltas, nahmen Wasser- und Sedimentproben mit einfachen, handbetriebenen Geräten (Abbildung 3) und filterten hunderte von Litern Wasser. Wenn es uns nicht möglich war, nachts nach Samoillow zurückzukehren, schlugen wir auf einer der einsamen und bestechend schönen Inseln im Delta unser Nachtlager auf.

Während unserer Expedition erlebten wir das Leben an Bord eines russischen Binnenschiffs sowie die Gastfreundschaft der Besatzung. Wir mussten oft mit Gesten Sprachbarrieren überbrücken und genossen für gewöhnlich Rentier-eintopf (Abbildung 4). Nach Verlassen des Deltas durchquerten wir die Buor-Chaja-Bucht, die unter schlechten Wetterbedingungen recht gefährlich sein kann.

Einer der Höhepunkte der Expedition war eine Übernachtung auf der Insel

Abbildung 2: Behelfsmäßiges Labor für die Verarbeitung von Wasserproben an Bord des Binnenschiffes „Putejski 405“: Filtrationsgerät, Probencontainer, Ausrüstung für die Dokumentation. (Foto: G. Mollenhauer)

Abbildung 3: Sammeln von Wasserproben der Lena vom Schiff aus, mit einer tragbaren Niskinflasche. (Foto: G. Mollenhauer)

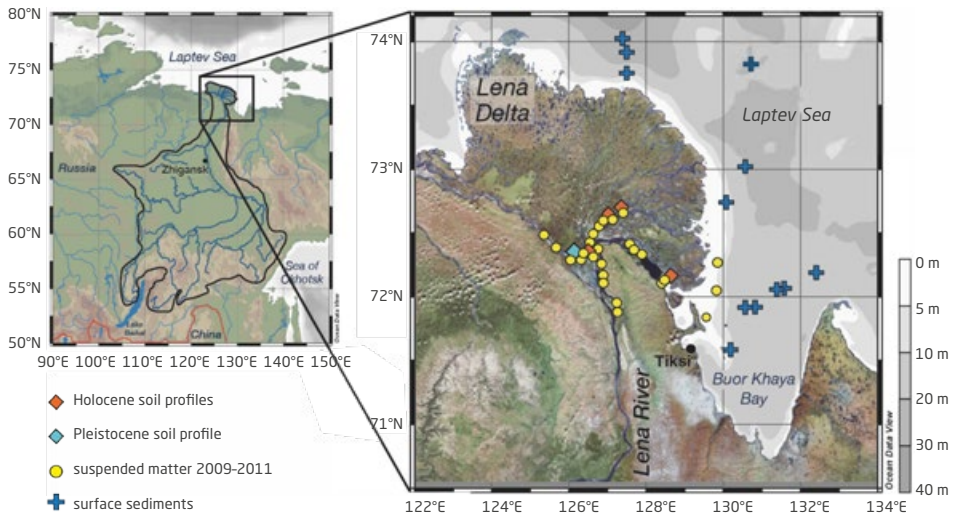


Muostach, wo unser russischer Kollege Mikhail (Misha) Grigoriev seine regelmäßigen Messungen der Küstenerosion durchführte. Wir hatten Gelegenheit, die Insel ein paar Stunden lang zu erkunden und versammelten uns dann am Strand, wo wir unser Lager aufgeschlagen hatten (Abbildung 5). Misha entfachte ein Lagerfeuer und zeigte uns, wie man zum Entzünden der ersten Flammen die Rinde von Birken verwendete, die oft als Treibholz am Strand zu finden sind. Wir kochten Tee über dem Feuer und Misha holte eine kleine Flasche Cognac aus seiner Tasche hervor. Es war der 23. August, die ersten Schneeflocken des Jahres fielen sachte herab und wir stießen auf den Geburtstag unseres Freundes an.

Aufbauend auf unseren Erfahrungen von 2009 wiederholten wir die Expedition im Sommer 2010. Dieses Mal war das Team größer und in zwei Gruppen unterteilt. Jede Gruppe wechselte sich ab, entweder mit dem Binnenschiff „Putejski 405“ die Stationen, an denen 2009 Proben entnommen worden waren, wieder zu besetzen oder mit dem Küstenschiff „TB-0012“ Wasser- und Sedimentproben in der Buor-Chaja-Bucht zu sammeln. Während das letztere Schiff besser für den rauen Wellengang der Bucht geeignet war, war keines der beiden für die Durchführung wissenschaftlicher Kampagnen ausgerüstet. Zwei junge deutsche Doktorandinnen sammelten mit Unterstützung eines auszubildenden Technikers die Wasser- und Sedimentproben. Wieder waren nur handbetriebene Probengeräte verfügbar und wir waren wieder in der Lage, einen mit 2009 vergleichbaren Probensatz zu sammeln. Dieses Mal wurde unsere Probenkampagne durch hydrologische Messungen eines Teams aus St. Petersburg ergänzt. Die Besatzung des Küstenschiffs wurde auch noch kreativ und schaffte es, kurze Sedimentkerne aus der Bucht zu entnehmen, indem sie eine Metallröhre in das flache Wasser stieß – in etwa wie beim Harpunieren eines großen Säugetiers.

Abbildung 4: Messe der „Putejski 405“ und deutsche Wissenschaftler beim Genießen des von der Besatzung gekochten Mittagessens. (Foto: G. Mollenhauer)

Abbildung 5: Lager am Strand der Insel Muostach. (Foto: G. Mollenhauer)



Im Spätsommer 2013 konnten wir schließlich ein kleines Forschungsschiff aus Murmansk chartern. Mehrere Gruppen nutzten dieses Schiff für eine spezielle Probenkampagne. Wasser- und Sedimentproben wurden entlang einiger Transekte direkt vor den Hauptarmen des Lenadeltas gesammelt (siehe Seiten 142-147). Insgesamt steht uns dank Kreativität und einfacher Probennahme-Strategien ein umfangreicher Probensatz zur Verfügung, anhand dessen wir die Zusammensetzung und das Alter von gelösten und partikelförmigen organischen Stoffen erforschen können, welche durch das Lenadelta ausfließen - von der Quelle bis zur Senke (Abbildung 6). Diese Proben wurden in zwei Master- und zwei Doktorarbeiten bearbeitet. Derzeit werden sie im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht. Unsere wertvollen Proben sind auch die Grundlage eines internationalen Forschungsprojekts, das im Sommer 2018 beginnt.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass partikelförmige und gelöste organische Stoffe im Lenadelta der Zusammensetzung lokaler Ablagerungen entspricht. Proben konnten nach Quelle unterschieden werden. Dies unterstreicht die Bedeutung des lokalen Eintrags für die gesamte Fracht an organischen Stoffen im Fluss.

*Gesine Mollenhauer, Maria Winterfeld, Boris P. Koch, Irina V. Fedorova*

Abbildung 6: Karte der Probenentnahmestellen aller Expeditionen von 2009, 2010 und 2013. Proben von Oberflächensedimenten wurden 2013 entnommen.



## Holozäne Seen rund um das Lenadelta

Paläolimnologische Studien von Seen rund um das Lenadelta wurden während der Lena-Expeditionen 1998, 1999, 2009, 2010 und 2017 durchgeführt (Abbildung 1). Seit 2003 schlossen die Studien auch verschiedene Seensysteme in ganz Ostsibirien ein. Die limnogeologische Arbeit wurde von den russisch-deutschen Partnerinstituten und durch verschiedene Drittmittel im Rahmen des SibLake-Programms gefördert.

Das untersuchte Gebiet erstreckt sich tief in das bewaldete Hinterland Jakutiens, in das Werchojansker Gebirge und bis nach Kamtschatka am Pazifik. Ziel unserer Studie ist es, eine umfassende räumliche Abdeckung zu erreichen, um die räumlich-zeitliche Dimension paläoökologischer Veränderungen in Sibirien zu erfassen. In diesem Sinne ist sie vergleichbar mit Wettervorhersagen, die auf einem umfangreichen Netzwerk aus Wetterstationen basieren. Uns interessiert vor allem der Zeitraum seit der letzten Eiszeit und dem Holozän. Diese Zeitspanne umfasst die natürliche Variabilität des Klimas der letzten 50.000 Jahre bis in die Ära des menschengemachten Klimawandels.

Abbildung 1: Paläolimnologische Forschungsstätten in der nördlichen Region des Flusses Lena: Nikolaj-See (1998/1999), namenlose Seen, die als Tik-Seen bezeichnet werden (2009), Kjutjunda-See and El'gene-Kjuelle-See (2010), Golzowoje-See und Polarfuchs-See nahe Tiksi (2017).

Abbildung 2: Feldlager und schwimmendes Stativ für Sedimentkernbohrung auf dem Kjutjunda-See. (Foto: B. Diekmann)

Die Herangehensweise unserer Feldforschung ist der Gewinnung von Seesedimenten gewidmet. Um paläolimnologische Veränderungen ablesen zu können, wurde an den Proben anschließend im Labor eine Radiokarbondatierung durchgeführt und sie mit sedimentologischen, geochemischen und mikropaläontologischen Methoden untersucht.

Als Beispiel dafür, wie abenteuerlich limnogeologische Feldforschung in der arktischen periglazialen Wildnis sein kann, wollen wir unsere Erfahrungen aus dem Spätsommer während einer Teilkampagne der russisch-deutschen Expedition „Lena 2010“ hervorheben.

3. September 2010: Ein letzter Flug über die ausgedehnte Tundra Nordostsibiriens. Endlich entdecken wir die ersten Gebäude am Horizont. Wir landen und laden fast zwei Tonnen an Expeditionsausrüstung aus dem vollgepackten Hubschrauber aus -- zum letzten Mal. Wir sind wieder zuhause in Tiksi, dem polaren Außenposten russischer Zivilisation am Arktischen Ozean. Hinter uns liegen drei Wochen Feldarbeit, die wir auf zwei Seen im Hinterland des Lenadeltas durchgeführt haben.

Die erste Reise führte uns 300 km südlich von Tiksi zum in der Waldtundra gelegenen Kjutjunda-See (3x3 km, 5 m Wassertiefe). Schwärme von Moskitos und Stechfliegen begrüßten uns, doch schon während der ersten Nächte wurden sie durch den nahenden Herbst vom Frost abgelöst. Wir schlugen unser Lager auf einem weichen Strand aus Torfablagerungen auf (Abbildung 2). Wir genossen unvergessliche Sonnenuntergänge um Mitternacht, die die Verkürzung der 24-stündigen Polartage ankündigten. Die Feldarbeit war sehr erfolgreich: Wir sammelten mehrere bis zu 8 m lange Sedimentkerne, die später die Geschichte der Seenentwicklung im Holozän und des sibirischen Klimas während der letzten 11,000 Jahre dokumentieren würden.

Zehn Tage später holte uns der Helikopter wieder ab und brachte uns zum El'gene-Kjuele-See 200 km weiter nördlich. Hier wurden wir mit der rauen Seite der Tundra konfrontiert. Diese Tage waren meist regnerisch und windig, die Nächte feucht und kalt; und nach und nach merklich länger. Auf dem weichen, klumpigen und feuchten Untergrund zu laufen, wurde zu einer konstanten Herausforderung, zu der unsere durchkühlten Gummistiefel durchgehende Schmatzgeräusche als Begleitkommentar lieferten. Diese Bedingungen konnten unsere Begeisterung für die bevorstehende Feldarbeit an diesem aufregenden Forschungsstandort jedoch in keinster Weise schmälern.



Der See befindet sich in einer 20 m tiefen und 3 x 5 km breiten Alas-Mulde, die von Schlick bedeckt ist (Abbildung 3). Heutzutage hat der See eine Fläche von 3 x 3,5 km und beschränkt sich auf den westlichen Teil des Beckens. Spektakuläre Steilhänge des Eiskomplexes aus dem Pleistozän (Yedoma) mit gewaltigen Eiskeilen grenzen oft an die Seeufer an. Die Yedoma-Formation zeigt Anzeichen thermischer Erosion mit typischen rückschreitenden Tauenbrüchen und Überbleibseln von gefrorenen, lössähnlichen Sedimentsäulen zwischen verlorenen Eiskeilen, also eine charakteristische „Eierkarton-Landschaft“.

Ein steiler Rücken von bis zu drei Metern Höhe grenzt an das Ostufer des Sees an. Der Grat geht in eine alte zum See gewandte Terrasse über, wo wir unser Lager aufschlugen. Junge Torfablagerungen bedecken die Terrasse. Darunter liegen fossile, subaquatische Sedimente, reich an Holzüberresten und fossilen Stämmen aus wärmeren Zeiträumen des frühen Holozäns. Unsere Feldarbeit begann mit einer bathymetrischen Vermessung des Sees. Diese ergab ein recht unebenes Unterwasserrelief mit zahlreichen unregelmäßigen subaquatischen Löchern von Tiefen bis zu 10 m.

Bis zu fünf Meter lange Sedimentkerne wurden an vier repräsentativen Stellen im See aus verschiedenen Wassertiefen entnommen (Abbildung 4). Wir sammel-

Abbildung 3: Blick Richtung Norden über das Thermokarst-Becken des El'gene-Kyuele-Sees (Foto: B. Diekmann). Am linken Seeufer gibt es kleine Deltas, entstanden durch die Neupositionierung von Sedimenten aufgrund von Schmelzeinbrüchen am Ufer.



ten auch Proben der fossilen Seesedimente, des Torfs auf der alten Terrasse am Seeufer, aus dem Yedomasediment und dem Grundeis. Spätere Studien der Sedimente ergaben, dass die Geschichte des Sees hauptsächlich von klimabedingter Absenkung durch Thermokarst und Veränderungen des Wasserspiegels sowie von Ufererosion und -migration während des Holozäns geprägt wurde.

*Bernhard Diekmann, Boris Biskaborn, Luidmila A. Pestryakova, Dmitry A. Subetto, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Ulrike Herzschuh, Georg Schwamborn, Volker Rachold*

Abbildung 4: Teil eines Sedimentkerns aus dem El'gene Kyuele-See zeigt helle Schichten der Sedimentneubildung durch die Ufererosion, eingeschlossen in dunkle, organische Gytja. (Foto: D. Subetto)



## Logistisch komplexe Einsätze - Beobachtungen von Energie- und Treibhausgasflüssen aus der Luft mittels Helipod

Einige der drängendsten Fragen bezüglich der Klima-Rückkopplungs-Prozesse in der sich erwärmenden Arktis sind: Welche Mengen der Treibhausgase (THG) Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) werden derzeit in den arktischen Permafrostgebieten freigesetzt? Verursacht die beobachtete Erwärmung bereits Veränderungen in den Energie- und THG-Dynamiken? Auf lokaler Ebene kann der Austausch von Wärme und THG zwischen Permafrost und Atmosphäre mit der sogenannten Eddy-Kovarianz-Methode überwacht werden (siehe Seite 76-81), die durchgehend Beobachtungsdaten liefert, und, sofern sie für den langfristigen Einsatz (d.h. Jahrzehnte) finanziert und gewartet wird, die Entdeckung solcher

Abbildung 1: Karte der Flugstrecken im Juni 2014 (nach NW) und August (nach NNW), farblich gekennzeichnet nach CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.



potenzieller Veränderungen und Trends auch trotz der natürlichen Variabilität zwischen einzelnen Jahren ermöglicht. Diese Arten der Beobachtung sind jedoch selten in der Arktis und unter anderem schränken logistische Bedingungen die Auswahl der Standorte ein. Infolgedessen decken diese Beobachtungen nur kleine Bereiche ab und es ist nicht immer klar, ob sie tatsächlich repräsentativ für die größere Region sind, die für die Forschung von Interesse ist.

Dieselbe Methode kann jedoch mithilfe von Flugzeugen, Hubschrauber-Schleppsonden oder unbemannten Fluggeräten (Drohnen) durchgeführt werden. Messungen aus der Luft können die räumlichen Einschränkungen der bodennahen Beobachtungen überwinden, da sie innerhalb weniger Stunden Entfernungen von mehreren hundert Kilometern zurücklegen können – ein Nachteil ist jedoch, dass sie nur Schnapsschüsse von bestimmten Zeitpunkten liefern. Die Kombination beider Herangehensweisen birgt großes Potenzial für die Entwicklung eines umfassenden Verständnisses vom tatsächlichen Beitrag der Permafrost-Ökosysteme zur Treibhausgasbelastung der Atmosphäre auf regionalem Maßstab.

### **Erste Wärme- und Treibhausgasflussmessungen aus der Luft über dem Lenadelta**

2012 wurde die Helikopter-Schleppsonde namens „Helipod“ von Samoilow aus eingesetzt, um die Durchführbarkeit von hubschraubergestützten Wärme- und Treibhausgasflussmessungen im gesamten Lenadelta nachzuweisen. Der Helipod gehört der Technischen Universität Braunschweig, ist 5 m lang, wiegt etwa 350 kg und wurde zunächst per Hand aus seinem „Hangar“ (einem Zelt hinter der Forschungsstation) zum Helikopterlandeplatz getragen – die Lieblingsaktivität aller Beteiligten. Dankenswerterweise wurde der immense Einsatz später darauf beschränkt, den Helipod auf einen von einem motorisierten Geländefahrzeug („Quad“) gezogenen Anhänger zu hieven. Der Helipod wurde dann mit einem 30 m langen Seil an einem russischen Helikopter vom Typ MI-8 befestigt und mit einer Geschwindigkeit von  $40 \text{ m s}^{-1}$  über das Delta geflogen. Die Sonde lieferte hochauflösende meteorologische Messungen turbulenter Fluktuationen von Wind, Temperatur, Feuchtigkeit,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  sowie die Infrarot-Oberflächentemperatur. Jede meteorologische Variable wurde von zwei sich ergänzenden Sensoren gemessen – einem mit einer kurzen Reaktionszeit aber niedriger absoluter Genauigkeit und einem mit einer längeren Reaktionszeit aber hoher Genauigkeit und langfristiger Stabilität. Ein komplementärer Filter kombinierte die beiden Datensätze.



Abbildung 2: Helipod kurz vor dem Start des ersten Fluges 2012.

Abbildung 3: Helipod fliegt am mikrometeorologischen Messturm auf Samoillow vorbei.

Zwei Flüge wurden 2012 durchgeführt und von einem Kamerateam des rbb („Geheimnisse im Eis der Erde“; rbb) als Teil einer 45-minütigen Dokumentation über die LENA-2012-Expedition gefilmt. Da die Verfügbarkeit eines Helikopters einem Sechser im Lotto glich, wurde nur ein Flug unter exzellenten Messbedingungen über dem Yedoma-Eiskomplex (dritte Terrasse des Lenadeltas) in nordöstlicher Richtung den Olenjokskaja-Kanal entlang durchgeführt. Der zweite Flug - unter weniger günstigen Bedingungen - führte über die zweite Terrasse in Richtung der Insel Arga-Muora-Sise nordnordwestlich von Samoilow. Das Flugmuster umfassten ein Viereck zur Windkalibrierung nach dem Start, vertikale Profile am Anfang und Ende jedes Transekts zur Bestimmung der Höhe der Grenzschicht sowie lange (100-130 km) Transekte in niedriger Höhe für Flussmessungen. Während beim ersten Start des MI-8 lediglich das „Hangar“-Zelt des Helipod vom Abwind der Rotorblätter weggeweht wurde, sorgte eine Panne beim zweiten Start dafür, dass die GPS-Antennen der Sonde verstellt und verbogen wurden. Glücklicherweise konnte dies in der Datennachbereitung korrigiert werden.

#### **Die intensive Flugkampagne 2014**

Nach der vielversprechenden Testrunde 2012 wurden größere Investitionen getätigt, um einen schnellen  $\text{CH}_4$ -Sensor in den Helipod zu integrieren und eine intensive Kampagne wurde für 2014 geplant. Die Flüge starteten im April, um den Zustand im Winter zu dokumentieren und folgten denselben Transekten



Abbildung 4: Helipod über der polygonalen Tundra des Lenadeltas.

wie 2012, von Samoiloow zur Küste. Diese wurden um einen zusätzlichen Flug über die erste Terrasse in Richtung des nordöstlichen Deltas ergänzt. Während der Schneeschmelze und des Eisaufbruchs wurde eine zweite Kampagne im Mai und Juni durchgeführt, um die Dynamik der Wärme- und Treibhausgasflüsse beim Übergang von Winter zu Sommer abzudecken. Eine finale Reihe von Flügen fand im August während der Hochsaison der Wachstumsphase und in zeitlicher Nähe zur maximalen Auftautiefe des Bodens statt.

### **Erste Ergebnisse**

Die Nachbereitung der Rohdaten aus dem Helipod stellte sich als komplizierter heraus, als man erwartet hatte. Nahezu alle Helipod-Experten an der TU Braunschweig hatten diese für andere Stellen verlassen oder waren in Pension gegangen und das überholte System zur Datenerhebung und -verarbeitung an sich erforderte eine eingehende Analyse. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, dass insbesondere die Nachbereitungssoftware des GPS-Lagebestimmungssystems an die ungünstigen geometrischen GPS-Satellitenkonstellationen in hohen Breiten angepasst werden muss, da unvermeidbare Konstellationsänderungen während der Flüge zu Diskontinuitäten in allen Positions- und Lagevariablen geführt hatten. Zur Zeit sind mehrere Projektanträge in der Begutachtung, mithilfe derer ein spezialisierter Mitarbeiter für die Durchführung der nötigen Anpassungen und die Anwendung weiterentwickelter Algorithmen zur Verbesserung des Windvektors gewonnen werden soll. Dieser ist die Grundlage für die Flussberechnungen und derzeit zeigen Analysen der Kospektren noch eine Korrelation zwischen Windkomponenten und Variablen des Bewegungsstatus.

Die Daten zur THG-Konzentration entlang der Flugrouten, wie in Abbildung 1 zu sehen, zeigen bereits eine signifikante räumliche und jahreszeitenabhängige Variabilität: Konzentrationen unterscheiden sich typischerweise während eines jeden Fluges um bis zu 5 ppm (parts per million). Der Unterschied von etwa 15 ppm im Konzentrationsniveau zwischen den Flügen am Anfang der Wachstumsperiode und während deren Hochphase zeigt die Effekte der bis dahin zwei Monate andauernden Photosynthese in der Tundra auf.

*Torsten Sachs, Eric Larmanou, Katrin Kohnert, Andrei Serafimovich*



## Lena Expeditionen: Einbindung neuer deutscher Forschungsgruppen

Die vorangegangene Großförderung und der Aufbau der russisch-deutschen Kooperation gab Impulse weiter in die Zeitspanne die danach folgte ohne die großen Förderprogramme. Angezogen durch die Pionierarbeit der russisch-deutschen Forschungsaktivitäten in der Lapteewsee kamen weitere deutsche Forschergruppen aus den Disziplinen der Küstenforschung, der Biologie, der organischen Chemie, und der Fernerkundung dazu und bekundeten ihr Interesse daran sich in dieses Forschungsprogramm und in die Lapteewseeregion zu involvieren. Im Sommer 2008 wurde eine Expedition organisiert, um im Rahmen

Abbildung 1: Gruppenfoto vor der FS Samoilow (August 2008). Von links nach rechts:

1. Reihe, sitzend: Gunter (Molo) Stooft (AWI Potsdam), Tina Sanders (Universität Hamburg), Karen Wiltshire (AWI Helgoland), Conrad Kopsch (AWI Potsdam), Sergey Volkov (Landschaftshüter, Lenadelta-Reservat), Niko Bornemann (AWI Potsdam), Moritz Langer (AWI Potsdam).
2. Reihe, sitzend: Karsten Reise (AWI Sylt), Irina Fedorova (Uni St. Petersburg), stehend: Pyotr Ivlev, Hans-Wolfgang Hubberten (AWI Potsdam), Maren Gruber (AWI Potsdam), Roland Doerffer (Küstenforschung, HZG);
3. Reihe: Ingeborg Bussmann (AWI Helgoland), Dirk Mengedoth (AWI Logistik), Mikhail Grigoriev (Melnikov Permafrost Institute, Jakutsk), Waldemar Schneider (AWI Potsdam), Susanne Liebner (ETH Zürich, DAAD), Svetlana Evgrafova (Sukachev Institute für Waldforschung, IL, Krasnojarsk), Paul Overduin (AWI Potsdam).



des Helmholtz Forschungsprogrammes PACES - Polar Regions and Coasts in the changing Earth System - Ökosystemforscher der Nord- und Ostseeküste in die Laptevsee-Region zu bringen. Die Expedition brachte die Küstenforscher zur Forschungsstation Insel Samoilow in das Lenadelta (Abbildung 1) und in die innere und westliche Laptev See Region mit Schiff (die Orlan, das Schiff des Lenadelta-Reservats) und Helikopter. Roland Doerffer (Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, HZG) bereitete die Expedition als Dokumentationsfilm auf, in dem wissenschaftliche Projekte und Wissenschaftler die in der Region arbeiten gezeigt werden.

Aus der Erkundungs-Expedition entwickelte sich das Konzept für die Funktion des Lenadeltas als Biofilter und eine Reihe weiterer Forschungshypothesen. Die Beteiligten organisierten für den darauffolgenden Sommer (2009) eine Schiffsexpedition in das zentrale Lenadelta und die Küstengewässer der Buor-Chaja-Bucht. Mikhail Grigoriev, Vize Direktor des Melnikov Permafrost Institutes



in Jakutsk, leitete die Expedition. Das Expeditionsteam beprobte Bodensedimente im Meer, im Fluss und an Land, Küstengewässer und das Lena Flusswasser, sowie eis- und organikreiche Küstenaufschlüsse (Abbildung 2a-c).

Im Sommer 2010 wurde die Beprobung zeitlich ausgeweitet auf eine mehrwöchige Beprobung der Lena über den Sommer hinweg zusammen mit Hydrologen der Universität St. Petersburg unter der Leitung von Irina Fedorova (Abbildung 3). Das Team beprobte regelmäßig die Seen auf Samoilow und das Flusswasser der Lena und führte biochemische Abbauxperimente aus um die zeitliche Dynamik und die Stabilität von organischem Material im Fluss und in den Thermokarstseen zu erfassen.

Abbildung 2a: August 2009, Beprobung Buor-Chaja-Bucht und Lena Fluss.

Abbildung 2b: August 2009, Blick auf Zeltlager Muastakh Insel.

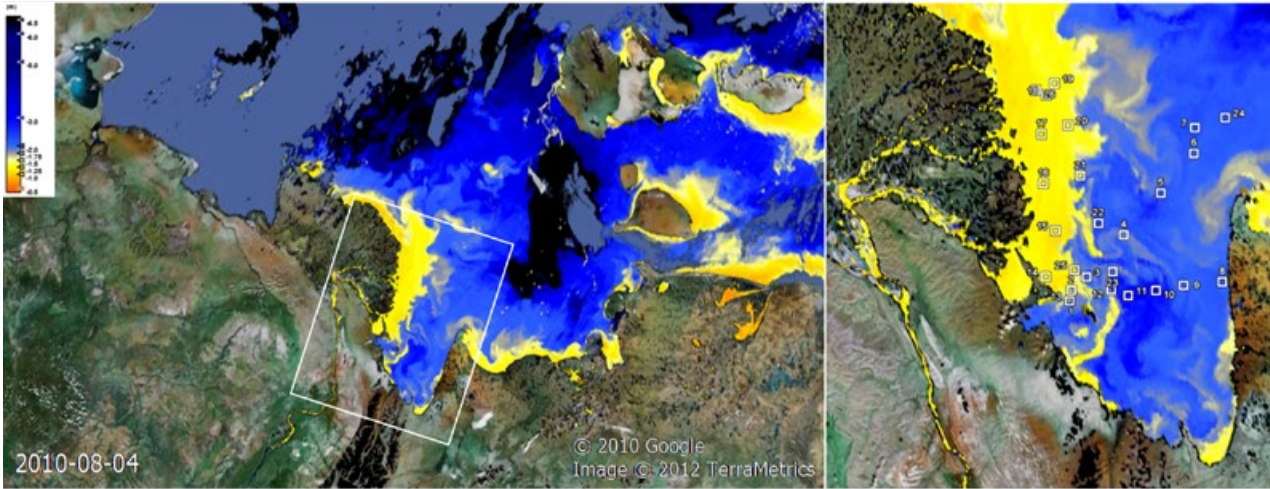
Abbildung 2c: August 2009, 2-Wochenexperiment zum optischen Abbau von Organik im Lena Lenawasser auf dem Schiffsdeck.



Die 2010 Schiffsexpedition (Abbildung 4) beprobte Wasser und Sedimente auch auf dem Schelf um die Beprobungen von 2008 und 2009, die sich auf die terrestrisch geprägten Küstengewässer fokussierten, in den marin geprägten Bereich auszuweiten und den Übergang von Küstensystemen zu marinen Systemen zu verstehen. Die Expeditionsdaten von 2008 bis 2010 lieferten wertvolle Validierungsdaten für Fernerkundungsprodukte von Ocean Color Satelliten, und zeigten dass der hohe organische Gehalt der Küstengewässer zu einer um eine Größenordnung zu hohe Chlorophyllüberschätzung aus Fernerkundungsdaten führte. Weitere Disziplinen profitierten ebenfalls und etablierten die Forschung von kleinen Schiffen aus in den Flachgewässern.

Abbildung 3: August 2010, Antonina Chetverova (St. Petersburg Universität), Irina Fedorova (St. Petersburg Universität), Ruth Flerus (AWI). Das russisch-deutsche Hydrologie Team auf regelmäßiger Beprobungstour des Flusswassers der Lena und der Thermokarstseen auf der Samoillow Insel im Sommer 2010.





Dieser Zeitabschnitt von 2007 bis 2012 band neue deutsche Forscher und Forschergruppen ein, erweiterte das Spektrum für Forschungsanwendungen im Lenadelta und in den Küstengewässern der Laptevsee und bekam die Anerkennung der russischen Seite zur Bedeutung dieser Wissenschaft die in der Region erreicht und fortgeführt wurde.

*Birgit Heim, Hans-Wolfgang Hubberten, Pier Paul Overduin, Irina V. Fedorova*

Abbildung 4: Laptevsee Region und Lenadelta (links), und die Stationen der Lena 2010 Schiffsexpedition (29.06.-07.08.2010) in der Buor-Chaja-Bucht (rechts). Die Farbkodierung zeigt die Erste Attenuationstiefe (Z90) abgeleitet aus einer MERIS Ocean Color Satellitendaten Aufnahme am 04.08.2010, Wolken sind dunkelgrau bis schwarz maskiert. Die Landflächen Darstellung basiert auf dem Google Earth™ Land Mosaik. (© 20120 Google, Image © 2012 TerraMetrics)

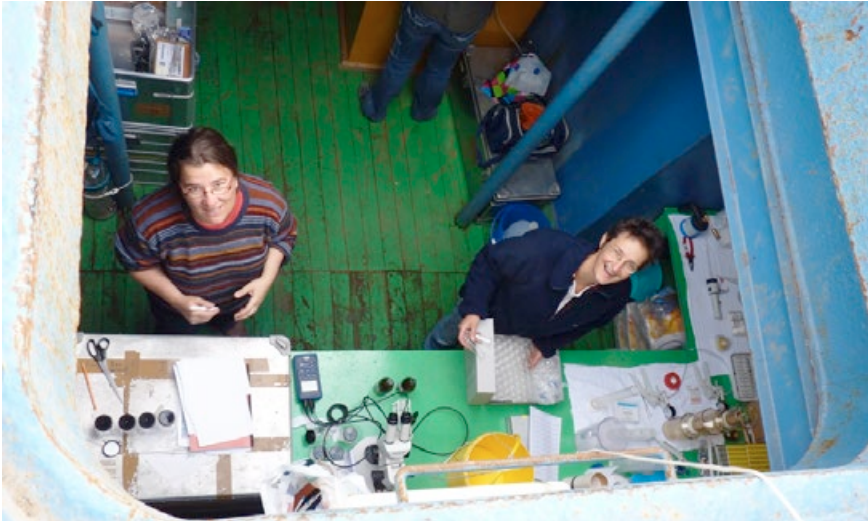


## Ein Jahrzehnt der Küstenforschung im Lenadelta

Ein besseres Verständnis von Küstensystemen in der sibirischen Arktis ist essenziell, da die Region sehr sensibel auf Umweltveränderungen reagiert. Schwankungen im fluvialen Abfluss und der Wassertemperatur beeinflussen die Temperaturen der Luft, des Meeres und des Permafrosts im Lenadelta. Es ist zu erwarten, dass all diese Veränderungen die Ökosysteme der arktischen Schelfe verändern werden. In unserer Küstenforschung untersuchen wir Prozesse an der Übergangsstelle vom Land ins Meer, von fluvialem Stofftransport, Hydrographie und Wasserchemie bis hin zur Geomorphologie der Küste und des submarinen Permafrosts.

Seit 2008 wurden in der Region einige Expeditionen mit kleineren Schiffen unternommen. Das Schelf der Laptewsee ist breit und flach und die Verfügbarkeit geeigneter Schiffe vor Ort ist ein einschränkender Faktor für die Küstenforschung. Seeschiffe mit großem Tiefgang können die flachen Küstenregionen

Abbildung 1: Ausstieg aus der „Orlan“, 2008. (Foto: C. Kopsch)



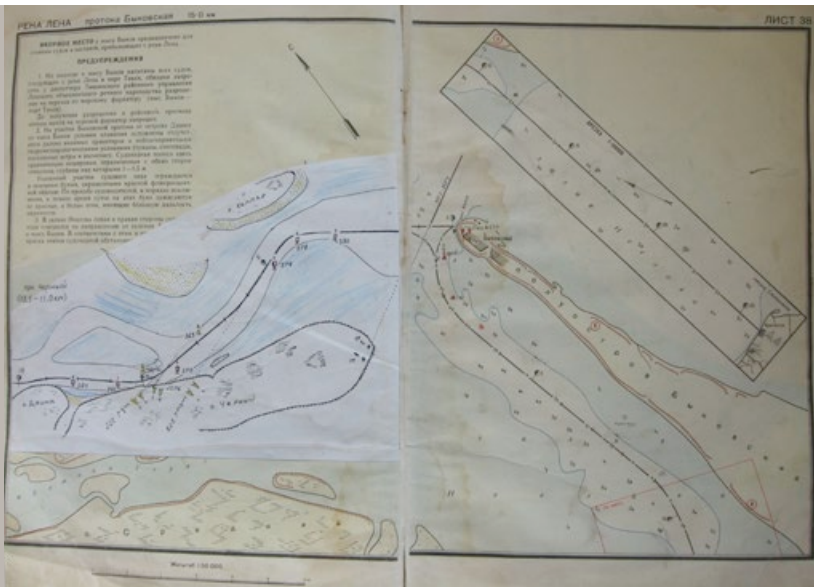
nicht erreichen, wohingegen Binnenschiffe mit geringem Tiefgang nicht auf dem offenen Meer eingesetzt werden können. Die Küste für die Feldarbeit an Land zu erreichen ist mit beiden Arten eine Herausforderung. Kleine Boote werden zum Übersetzen von größeren Schiffen an die Küste verwendet. Flussschiffe werden entweder auf Sandbänken vor Anker gelegt oder gestrandet und mit Planken oder Leitern verlassen und betreten. In jedem Fall kann das Anlanden eine eher nasse Angelegenheit sein (Abbildung 1).

Fast keines der genutzten Schiffe war ein eigens eingerichtetes Forschungsschiff. Daher musste die gesamte Ausrüstung für die Probennahme und -nachbereitung an Bord gebracht werden. Die meisten unserer Geräte (wie Wasserprobennehmer und Sedimentbohrer) waren tragbar. Der Platz an Bord war begrenzt und wir lernten schnell zu improvisieren, um die verfügbaren Arbeitstische und andere kleine Stellplätze in „Minilabore“ (Abbildung 2) umzuwandeln.

Die Navigation war in den ersten Jahren eine Herausforderung. Der Zugang zu Seekarten war eingeschränkt und detaillierte Schiffsrouten mussten vor Ort mithilfe der Erfahrung der Besatzung und per Hand korrigierter Flusskarten (Abbildung 3) entwickelt werden. Später war es möglich, Karten vorab zu besorgen (Abbildung 4). In den letzten Jahren hat sich die Navigation mit tragbaren GPS-Systemen immer mehr durchgesetzt.

Der Großteil der Expeditionen mit den Flussschiffen Orlan und Putejski 405 wurden als Tagesausflüge durchgeführt. Entweder kehrten wir jeden Abend

Abbildung 2: Arbeit im Rumpf der „TB 0012“. (Foto: M. Löder)

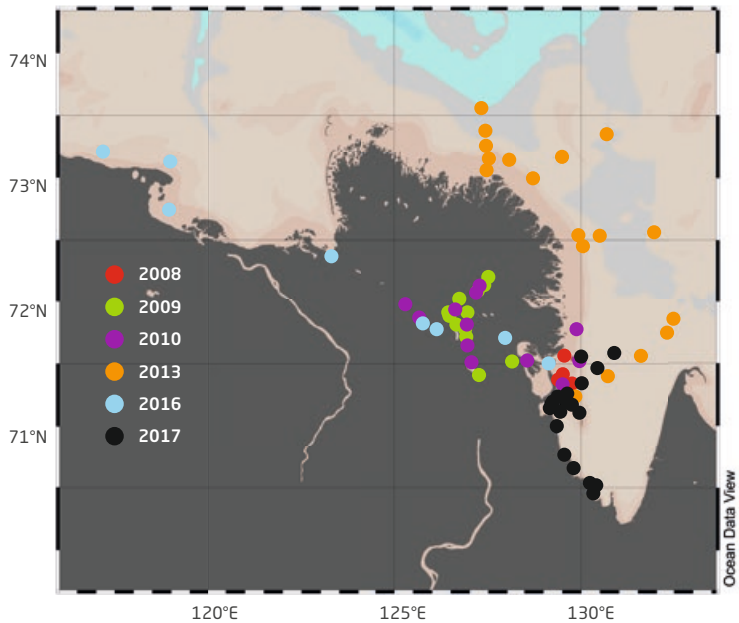


zur Forschungsstation Insel Samoilow zurück oder schlugen am Strand unsere Zelte auf. Die Arbeitszeiten waren sehr flexibel. Manchmal zogen wir uns wegen schlechten Wetters in unsere Zelte zurück, aber nahmen um 4:00 morgens wieder unsere Arbeit auf, weil sich das Wetter genug gebessert hatte, um Borduntersuchungen zu ermöglichen. Das hochdynamische Sedimentsystem des Lenadeltas barg ganz spezielle Überraschungen: Beispielsweise lief das Schiff auf einer Sandbank auf, die sich verlagert hatte. Solche abrupten Stopps machten Laborarbeiten wie die Filtration oder das Gießen von Wasser zu ambitionierten Tätigkeiten.

Die größeren Schiffe wie TB-0012 und Nicole (15 m) verfügten über kleine Kajüten und ermöglichten gemeinsame Mahlzeiten mit der Besatzung. Wissenschaft und Leben an Bord des Forschungsschiffs Dalnie Zelentsy waren durchstrukturiert, mit mehreren Laboren, Kajüten und einer großen Messe. Das kleine glasfaserverstärkte Kajütboot Nicole, das in Venedig gebaut wurde, wurde seit 2016 jährlich eingesetzt. Unter ruhigen Bedingungen ist die Nicole schnell und macht es einfach, abgelegene Standorte zu erreichen.

Diese zusammengewürfelte Infrastruktur hat es uns in den letzten zehn Jahren der gemeinsamen Küstenforschung dankenswerterweise ermöglicht, wichtige Basisinformationen und entscheidende Daten aus einer großen Region des Lenadeltas und umliegender Küstengewässer zu gewinnen.

Abbildung 3: Flusskarte von 2009. (Foto: G. Kattner)



2008 sammelte die Orlan, mit A. Gukov als leitendem Wissenschaftler, Proben in der Lena um die Forschungsstation Insel Samoillow herum. Auf dem Rückweg nach Tiksi wurden zusätzliche Wasser- und Sedimentproben gesammelt, um Satellitendaten zu validieren. 2009 wurde die Putejski 405, mit I. Fedorova und G. Kattner als leitenden Wissenschaftlern, eingesetzt, um das Lenadelta erneut zu beproben, diesmal mit einem speziellen Fokus auf der chemischen Zusammensetzung gelöster und partikulärer organischer Stoffe.

2010 konnten wir mit zwei Forscherteams zwei Schiffe chartern. Die Putejski 405 wurde im Fluss Lena eingesetzt und die TB 0012 im Lenadelta (Abbildung 6). Raue Bedingungen durchkreuzten einen Versuch, Teams und Ausrüstung im offenen Gewässer außerhalb des Deltas auszutauschen. Daher kehrten beide Schiffe in die geschützte Bucht der Bykowski-Halbinsel zurück. 2010 konzentrierte sich die Forschung auf die Zusammensetzung und Verteilung von Phytoplankton innerhalb des Deltas sowie auf die Ausbreitung von Methan mit dem Flusswasser.

2013 wurde die RV Dalnie Zelentsy in Zusammenarbeit mit unseren Kollegen des Murmansk Marine Biological Institute (Abbildung 7) eingesetzt. Der Beginn der Expedition wurde aufgrund eines verspäteten Fluges von Murmansk nach Tiksi verschoben. Uns erwartete aber eine noch größere Verzögerung: Eis in

Abbildung 4: Brücke der „TB102“ mit Kapitän und Offizier. (Foto: I. Bussmann)

Abbildung 5: Karte der erforschten Region



der Wilkizkistraße verlangsamte das Forschungsschiff auf seinem Weg von Murmansk nach Tiksi. Dank dem ungeheuren Einsatz unserer deutschen und russischen Logistik-Abteilungen schafften wir es immerhin, zumindest sechs Tage an Bord herauszuschlagen. Wir konnten mit der Dalnie Zelentsy den nördlichen Teil des Deltas erreichen und erlangten neue Erkenntnisse zur Verteilung und relativen Anreicherung farbiger gelöster organischer Stoffe, Phytoplanktons und Methans sowie zum Einfluss submarinen Grundwassers.

2016 wurde die Nicole für eine lange Reise von Tiksi westwärts durch das Lenadelta gechartert. Ein Tankstopp bei der Forschungsstation Insel Samoilow ermöglichte es uns, die westliche Laptewsee durch den Olenyoskaya-Kanal zu erreichen. Am westlichsten Punkt unserer Reise landeten wir am Standort der 2005 COAST-Expedition an und besuchten die Bohrstelle. Die Nicole erwies sich als sturmsichere Plattform für ozeanographische Studien und Studien des submarinen Permafrosts, inklusive der Validierung von Daten für Ocean Color Satellite-Missionen (Messungen der Ozeanfarbe per Satellit) und der Erforschung von submariner Permafrost- und Methanverteilung.

Einige bisher unerforschte Standorte entlang der Küstenlinie der Buor-Chaja-Bucht wurden an Bord der Nicole im August 2017 untersucht (Abbildung 8). Während der Reise sammelten wir GPS-Höhendaten sowie Material für die Radiokohlenstoffdatierung. Wir wollten das Potenzial der Standorte als paläo-ökologische Archive für die Rekonstruktion des Meeresspiegels und der Wellenenergie im Holozän deutlich machen.

Außergewöhnliche russisch-deutsche Zusammenarbeit unter außergewöhnlichen Bedingungen mit außergewöhnlichen logistischen Anforderungen ergaben zehn Jahre außergewöhnlicher wissenschaftlicher Unternehmungen in einer außergewöhnlichen Umgebung. Wir freuen uns auf die nächsten zehn Jahre wissenschaftlicher Zusammenarbeit.

*Ingeborg Bussmann, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Irina V. Fedorova, Mikhail N. Grigoriev, Alexander Yu. Gukov, Gerhard Kattner, Alexandra Kraberg, Denis V. Moiseev, Pier Paul Overduin, Lasse Sander, Karen H. Wiltshire*

Abbildung 6: „TB 0012“, 2008 nahe der Bykowskyhalbinsel. (Foto: I. Bussmann)

Abbildung 7: RV „Dalnie Zelentsy“ im Hafen von Tiksi. (Foto: A. Kraberg)

Abbildung 8: „Nicole“. (Foto: P. Overduin)



5.

Neue Horizonte für Lena-  
Expeditionen - Die neue Forschungs-  
station Insel Samoillow

(Photo: P. Verzzone)







## Ministerpräsident W. W. Putin besucht die Insel Samoillow (P-Day)

Manchmal gibt es unvergessliche Tage, an denen sich etwas wahrlich Einzigartiges ereignet. Einer dieser Tage war der 23. August 2010, als der damalige russische Ministerpräsident Wladimir Putin die russisch-deutsche Forschungsstation Insel Samoillow besuchte. Dieser Tag, intern ‚P-Day‘ genannt und zufällig auch der Geburtstag von Mikhail ‚Misha‘ Grigoriev, war ein ganz besonderes Ereignis, das nur ein paar Stunden dauerte, aber das Leben auf dieser kleinen Insel drastisch veränderte.

Alles begann ein paar Wochen zuvor, als Gerüchte die Runde machten, Ministerpräsident Wladimir Putin würde den Norden Russlands - und dabei eventuell auch das Lenadelta - besuchen. Als Helikopter- und Schiffsverkehr im Delta zunahmen und ein vorübergehendes Lager auf einer der kleinen Inseln gegenüber der Insel Kurungnach aufgeschlagen wurde, nur ein paar Kilometer von Samoillow entfernt, wurden die Dinge langsam konkreter. Putins persönlicher Stab besuchte uns und lud uns dazu ein, eine „wissenschaftliche“ Präsentation im erwähnten Lager zu halten. Wir antworteten, dass die echte Wissenschaft nur auf Samoillow gezeigt werden könne und schlugen vor, dass der Ministerpräsident unsere vier Quadratkilometer besuchen sollte. Dem stimmte man nach weiteren Besuchen des persönlichen Stabs und der Sicherheitsberater zu.

Abbildung 1: Begrüßung von Ministerpräsident Wladimir Putin auf Samoillow.



Jeden Tag, den das Ereignis näher rückte, stieg die Anspannung und dann begann er: der P-Day. Es startete damit, dass zunächst ein MI-8-Helikopter Journalisten und Sicherheitskräfte ausspuckte und dann ein zweiter, ein dritter und ein vierter auf der Insel aufsetzte. Plötzlich war die Zahl der Personen auf der Insel von etwa zwanzig auf mehr als hundert angestiegen. Seltsame Leute bevölkerten die Insel: Einige waren mit Maschinengewehren ausgerüstet, andere machten Fotos, drehten Videos oder interviewten Wissenschaftler. Dann tauchte ein fünfter Helikopter – ein größerer, weißer MI-8 – auf und wir wussten, dass er es war. Der Helikopter landete und der Ministerpräsident wurde von den „nat-schalniks“ (Leitern) der Expedition empfangen. Sie führten Putin durch einen vorbereiteten wissenschaftlichen Parcours, um ihn über die wissenschaftliche Arbeit der russischen und deutschen Kollegen zu informieren, die sich dem sibirischen Permafrost widmet. Putin besuchte die Feldversuche zu Mikrometeorologie, Studien der Treibhausgasflüsse und zur Erforschung des Paläoklimas des Alfred-Wegener-Instituts in Potsdam, der Universitäten Hamburg und Köln, des Arktischen und Antarktischen Forschungsinstituts (AARI) in St. Petersburg, des Permafrost Instituts in Jakutsk, der Staatlichen Universität Moskau und des Waldforschungsinstituts (Sukachev Institute) in Krasnojarsk.

Während wir unsere Arbeit und unsere regionalen Besonderheiten erklärten, kamen wir ihm extrem nah. Wir hatten sogar die Gelegenheit, zusammen mit Wladimir Putin, einem der mächtigsten Menschen auf diesem Planeten, in den Permafrost zu bohren, um ihm zu zeigen, dass der Boden nur wenige Dezimeter unter seinen Füßen gefroren ist. Während des Bohrens fragte er scherzhaft, ob wir sein stündliches Honorar wüssten. Er wäre zweifellos ein teurer Bohrassistent gewesen. Wir hatten den Eindruck, dass er sich amüsierte und seinen Besuch genoss und er war sehr offen und sicher viel persönlicher als im Fernsehen. Er sprach exzellent Deutsch und verbesserte sogar seinen Dolmetscher, als jener einen Fehler machte.

Abbildung 2: Svetlana Evgrafova erklärt Putin die Wichtigkeit mikrobieller Aktivität im Permafrost.

Abbildung 3: Permafrostbohrung mit Putin (H. Meyer, A. Dereviagin).



Dann besuchte er die Station, zwei gemütliche aber einfache Holzhütten. Hier gab es eine einstündige Diskussionsrunde zwischen Putin und Teilnehmern der Expedition, die für das russische Fernsehen aufgezeichnet wurde. Putin diskutierte die derzeitige Situation und die Zukunft gemeinsamer Polarforschung in Nordrussland mit russischen und deutschen Wissenschaftlern und Studenten. Während dieser Diskussion erhielt Misha eine Uhr als Geburtstagsgeschenk. Ministerpräsident Putin betonte, dass wir äußerst wichtige Arbeit leisteten, fügte aber beiläufig hinzu, dass wir wie „clochards“, oder Landstreicher, lebten und sagte dann, dass er einen Vertrag für den Bau einer neuen wissenschaftlichen Forschungsstation auf der Insel unterzeichnen würde. Ein kurzer Besuch an diesem einen, seltsamen Tag änderte das Schicksal unserer kleinen Insel.

Wenn wir jetzt, 2018, zurückblicken, können wir dankbar sagen, dass er sein Versprechen gehalten hat: die Bauarbeiten begannen 2011 und die neue, moderne, blau-weiß-rote Station wurde 2013 fertiggestellt und beherbergte das erste Expeditionsteam im April desselben Jahres. Diese beeindruckende Forschungsstation wird das ganze Jahr über von einem fantastischen Team unter der Leitung von Fyodor Sellyakhov betrieben und bietet viele Möglichkeiten wie einen neuen Laborkomplex, Transportfahrzeuge, Bohrgeräte aber auch 24 Stunden am Tag Strom, WLAN und eine heiße Dusche, was die Feldarbeit sogar während des strengsten arktischen Winters ermöglicht.

Bol'shoye spasibo, Vladimir Vladimirovich!

*Hanno Meyer, Thomas Opel, Alexander Yu. Dereviagin, Svetlana Yu. Evgrafova, Waldemar Schneider, Alexander S. Makarov, Mikhail N. Grigoriev*

Abbildung 4: Diskussionsrunde zwischen Putin und Expeditionsteilnehmern.

Abbildung 5: Gruppenfoto von Russlands Ministerpräsident Wladimir Putin und den Teilnehmern der Expedition „Lenadelta 2010“ vor der russisch-deutschen Forschungsstation Insel Samoillow.

(Alle Fotos: T. Opel)



## Die neue Forschungsstation Insel Samoilow: Bau, Eröffnungsfeier, Anlage und Betrieb

Die wissenschaftliche Forschungsstation Insel Samoilow wurde 2011 und 2012 auf Anordnung der Regierung der Russischen Föderation gebaut, um die Erforschung der Ökologie in der Arktis zu fördern. Das Trofimuk-Institute für Erdöl-Gas-Geologie und Geophysik, Sibirischer Zweig der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAS), Nowosibirsk, (IPGG SB RAS) betreibt die Station seit 2012.

### **Bau**

Der Bau einer neuen Station auf der Insel begann im Sommer 2011, unmittelbar nach einem vorbereitenden ingenieurtechnischen und geologischen Gutachten, das jedem Bau vorausgeht. Zunächst lieferten große Schiffe eine Vielzahl an Baumaterialien und -modulen von Archangelsk zum Hafen von Tiksi. Die Ladung beinhaltete auch Transportfahrzeuge für Expeditionen wie Boote, einen Transportbus, ein fahrbares Bohrgerät und vieles mehr. All diese Güter wurden dann auf Binnenschiffen durch die flachen Arme des Lenadeltas zur Insel transportiert.

Etwa 100 Arbeiter kamen auf Samoilow an, wo sie zunächst eine vorübergehende Unterkunft errichteten. Kurz danach wurde viel spezielles Baugerät angeliefert. Später begannen die Arbeiten damit, hunderte von Stahlrohrpfählen bis zu einer Tiefe von 15 m im Boden zu verankern und diese mit Beton zu füllen. 2012

Abbildung 1: Die neue Forschungsstation Insel Samoilow



war der Rohbau fertig. Schließlich wurde auf mehreren Ebenen des Gebäude-Komplexes mit den Ausbauarbeiten begonnen. Im selben Jahr entschied die russische Regierung, die Station unter die Leitung des IPGG SB RAS in Nowosibirsk zu stellen.

### **Erste Feldarbeit**

Die erste Forschungsexpedition auf der Station wurde im Frühjahr und Sommer 2013 durchgeführt. Alles auf der Station war ausgezeichnet. Wir fühlten uns sehr wohl, beinahe wie an einem Urlaubsort. Der einzige Unterschied bestand hier in den arktischen Temperaturen. Das technische Personal und der Stationsleiter Fyodor Sellyakhov haben sich bei dieser Expedition selbst übertroffen. Die Station nahm ihren Betrieb auf.

### **Eröffnung**

Die offizielle Eröffnungsfeier der Station fand am 23. September 2013 statt. Wir luden Präsident Wladimir Putin ein, an der Feier teilzunehmen, da er derjenige war, der hauptsächlich den Bau der neuen Station initiiert hatte. Seine Verwaltung informierte uns, dass der Präsident zu jener Zeit leider sehr beschäftigt sei, uns aber seine besten Wünsche ausrichten ließ. Wir erfuhren, dass der Präsident am diesem Tag die Arktis-Konferenz in Salechard leitete. Einige unserer eingeladenen Gäste konnten ebenfalls aufgrund ihrer Teilnahme an der Konferenz in Salechard nicht teilnehmen, unter anderem das Regierungsoberhaupt der Republik Jakutien, der Vorsitzende des SB RAS, etc. Viele andere Gäste kamen jedoch zur Eröffnungsfeier. Sie flogen von Jakutsk nach Tiksi und dann per Helikopter zur Station. Die Gäste bekamen eine Führung zu den Messfeldern und durch die Station. Begrüßungsansprachen, das Durchschneiden des Bandes, eine zeremonielle Schlüsselübergabe, Geschenke - all dies war sehr schön und symbolisch.

Abbildung 2: Frachtlieferung nach Samoilow auf Binnenschiffen, Juli 2011. (Foto: G. Stoof)

Abbildung 3: Pfähle für die Gebäude der neuen Station, Juli 2011. (Foto: V. Mikheev)



An der Eröffnungsfeier nahmen Regierungsvertreter Jakutiens, Leiter des sibirischen und Fernost-Zweigs der RAS, die Logistik des Alfred-Wegener-Instituts, Institutsleiter und Akademiemitglieder der RAS, leitende russische und deutsche Wissenschaftler, die an den Lena-Expeditionen beteiligt waren, der deutsche Konsul in Nowosibirsk, der Geschäftsführer von Spetstroy Rossii Co. sowie Reporter von Nachrichtenagenturen inklusive des Fernsehsenders Rossija teil. Eine kleine wissenschaftliche Konferenz informierte die Gäste über die Aufgaben und Perspektiven der neuen Station, gefolgt von einem Festbankett.

Die Gäste bekamen einen Eindruck von der Begeisterung der Wissenschaftler für ihre Arbeit und lernten viel über die Aktivitäten der Lena-Expeditionen in der Arktis sowie die Möglichkeiten zukünftiger Arbeit auf der neuen Forschungsstation. Die Station wurde offiziell eröffnet und die Gäste verabschiedeten sich, um uns unserer Arbeit in der Arktis nachgehen zu lassen. Drei Flaggen – die russische, deutsche und jakutische – waren stets am Stationseingang und im Konferenzsaal gehisst.

### **Betrieb**

Die Station wird seit 2013 das ganze Jahr über betrieben. Sie ist mit einer Reihe moderner wissenschaftlicher Instrumente und Geräten ausgestattet, die in verschiedenen Forschungsbereichen erforderlich sind (Bio- und Geochemie, Geophysik, Klimaforschung, Hydrologie, etc.). Was die Unterkünfte angeht, so bietet die Station Komfort von Weltrang.

Abbildung 4: Das erste Feldforschungsteam der Lena 2013-Expedition vor der neuen Station, April 2013. (Foto: M. Grigoriev)

Abbildung 5: Eröffnungsfeier. Banddurchschneidung der neuen Forschungsstation Insel Samoillow: Akademiemitglied Prof. Mikhail Epov (Direktor, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics, Russian Academy of Sciences Siberian Branch in Nowosibirsk, links), Prof. Mikhail Grigoriev (stellv. Direktor, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences in Jakutsk, Mitte) und Dmitry Glushko (Vizepräsident der Republik Sacha aus Jakutsk, rechts). (Foto: H.-W. Hubberten)



Der Sibirische Zweig der Russischen Akademie der Wissenschaften (SB RAS) zusammen mit dem Fernost-Zweig der Russischen Akademie der Wissenschaften (FEB RAS), dem meteorologischen Dienst des Arktis- und Antarktis Forschungsinstituts (AARI), der Nordöstlichen Föderalen Universität, dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und einer Reihe weiterer Partner haben ein gemeinsames arktisches Forschungsprogramm entwickelt, für integrierte Forschungen zum Zustand und der Entwicklung der Umwelt in der sibirischen Arktis. Jedes Jahr führen Forscher von IPGG SB RAS, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, AARI, AWI, und anderen russischen, deutschen und internationalen Wissenschafts- und Bildungsorganisationen eine große Menge an wissenschaftlicher Arbeit im Lenadelta als Teil gemeinsamer Expeditionen durch. Das Forschungsprogramm befasst sich sowohl mit nationalen wissenschaftlichen Forschungsfragen im Austausch mit russischen Organisationen als auch mit internationalen Programmen und ist auf die Erforschung von globalen Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Arktis ausgerichtet, die sich im Lenadelta und in der Laptewsee abspielen.

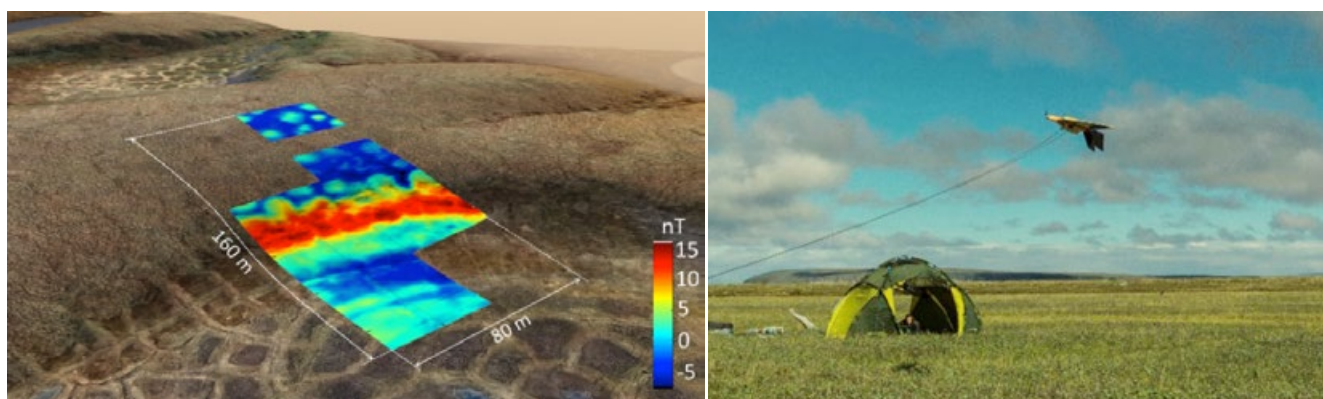
Hauptziele des Projekts sind:

1. Erhebung von Daten zur Entwicklungsgeschichte der Region der Laptewsee während des Pleistozäns und Holozäns (Schwankungen des Meeresspiegels, Paläoklima, Vereisungen, Permafrost-Evolution, Paläogeographie);
2. Bewertung des Beitrags der arktischen Tundra zu globalen Treibhausgasemissionen (Methan, Kohlenstoffdioxid) und Bestimmung der Intensität und

Abbildung 6: Co-Vorsitzende der Konferenz zum Anlass der Stationseröffnung. Von links nach rechts: Vizepräsident der Republik Sacha (Jakutien), Dmitry Glushko, stellv. Vorsitzender des Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences und Direktor des IPGG SB RAS, Akademiemitglied Mikhail Epov, Generalkonsul Deutschlands in Nowosibirsk, Neithardt Höfer-Vissing, Vorsitzender des Fernost-Zweigs der Russian Academy of Sciences, Akademiemitglied Valentin Sergienko, 23. September 2013. (Foto: H.-W. Hubberten)

Abbildung 7: Maximale Springflut nahe der neuen Forschungsstation Insel Samoilow, 1. Juni 2012. (Foto: M. Grigoriev)





der Herkunft der Gasemissionen in die Atmosphäre unter verschiedenen Landschaftsbedingungen;

3. Erfassung der Menge an festen Stoffen und Kohlenstoff, die im Zuge von Erosionen der Flussufer über die Flüsse in die Laptewsee gelangen sowie die Menge an organischem Kohlenstoff (Kohlenstoffkreislauf in der Atmosphäre und Hydrosphäre);
4. Erforschung der Wechselwirkung von natürlichen Prozessen in der Region und deren Reaktion auf moderne Klimaschwankungen.

In den letzten Jahren haben Wissenschaftler des IPGG SB RAS die Permafrostforschung mittels einer Reihe an geophysischen Methoden wie Luftbildaufnahmen, magnetischen Messungen, elektrischer Widerstandstomographie, elektromagnetischer Bildgebung, Wärmeüberwachung, etc. vorangetrieben.

Die jährliche Expedition auf Samoillow, die von einer gemeinsamen Feldforschungsgruppe bestehend aus Wissenschaftlern des IPGG SB RAS und der Staatlichen Universität Nowosibirsk durchgeführt wird, ist ein gutes Beispiel für die interdisziplinäre Herangehensweise an die komplexe Erforschung der Arktis. Diese Expedition vereint die moderne Geophysik mit dem reichen Erfahrungsschatz der Geologen, Paläontologen, Paläomagnetologen, Botaniker und Bodenkundler aus Nowosibirsk zur Permafrostforschung im Lenadelta. Einige interessante Forschungsobjekte, die in der arktischen Region verbreitet sind, wurden untersucht: Thermokarstseen, Alase (entwässerte Becken der Thermokarstseen), Pingos, Taliks unter Seen und Flussarmen, Erosionstäler, Yedoma-Sedimente, sich zersetzender submariner Permafrost und vieles mehr.

Abbildung 8: Anomales Magnetfeld abgebildet auf dem texturierten digitalen Höhenmodell (links); unbemanntes Fluggerät (engl. ‚unmanned aerial vehicle‘, UAV) mit Ausrüstung zur Luftbildmessung beim Start (rechts).



Zusammen mit Kollegen aus anderen Ländern (Deutschland, Finnland, Kanada, USA, Japan, Schweden und weiteren) arbeiten wir an der Datenaufbereitung und -interpretation sowie an Veröffentlichungen. Wissenschaftler aus Nowosibirsk heben mit ihrer erfolgreichen Arbeit die Qualität der Arktisforschung auf ein neues Niveau. Dies ist insbesondere in Russland von Bedeutung, wo Permafrost den Großteil der Fläche bedeckt. Man kann mit Sicherheit sagen, dass diese Forschungsrichtung in den nächsten 50 Jahren dominant sein wird.

### **Schlussfolgerung**

Es ist schon einzigartig, wenn das Projekt einer internationalen wissenschaftlichen Arktis-Expedition während 20 Jahren ununterbrochen andauert. Die Expedition „Lena“ ist ein außergewöhnliches Beispiel. Wir hoffen, dass die „Forschungsstation Insel Samoillow“ eine hervorragende und verlässliche Basis für weitere erfolgreiche Forschungsarbeiten für viele weitere Jahre sein wird.

*Mikhail N. Grigoriev, Hans-Wolfgang Hubberten, Igor N. Yeltsov,  
Anne Morgenstern*

Abbildung 8: Treffen von AWI-Vertretern und dem Direktor IGPP SB RAS, Igor N. Yeltsov, auf Samoillow im August 2017 zur Planung künftiger Kooperationen und Expeditionen. Von links: Karsten Wurr, Verwaltungsleiter AWI, Waldemar Schneider, Logistik AWI, Guido Grosse, Leiter der Permafrost-Forschungsabteilung des AWI, Hans-W. Hubberten, AWI, Igor N. Yeltsov.

## Samoilow in internationalen Programmen und Netzwerken – FLUXNET, GTN-P, INTERACT

Samoilow hat sich in den letzten zwanzig Jahren zu einem wichtigen und international anerkannten Forschungsstandort für terrestrische Polarforschung entwickelt. Der Betrieb von Langzeitmessstellen und Feldversuchen auf der Insel hat Ergebnisse und Datensätze hervorgebracht, die für die wissenschaftliche Gemeinschaft hochrelevant sind: Sie sind in vielfacher Hinsicht einzigartig. In Bezug auf Standardparameter, die zirkumarktisch oder global gemessen werden, sorgt der Standort Samoilow für die wertvolle regionale Erfassung der ostsibirischen Arktis, wo Beobachtungsstätten viel seltener sind als in anderen Teilen der Welt. Andere wichtige Daten resultieren aus der langfristigen Zusammenarbeit der russisch-deutschen Forscherteams, ihrer Fachexpertise und ihren fundierten Kenntnissen zu Permafrostlandschaften und Prozessen in der Region. Die Ergebnisse und Datensätze wurden in wissenschaftlichen Arbeiten veröffentlicht und über Open-Access-Datenbanken wie PANGAEA (Datenherausgeber für Geo- & Umweltwissenschaften, Mitglied des World Data System (WDS) des Internationalen Wissenschaftsrates, ‚International Council for Science‘ (ICSU), <https://www.pangaea.de>) öffentlich zugänglich gemacht. Andere internationale Forscherteams haben diese Ergebnisse für Standortvergleiche, Modellentwicklung, Synthesen und vieles mehr verwendet. Die Ergebnisse und Datensätze haben auch zu großen, multilateralen Forschungsprojekten wie dem EU FP7-Projekt PAGE21 oder dem Permafrostprojekt im Data User Element (DUE) Programm der Europäischen Weltraumorganisation (European Space Agency, ESA) beigetragen. Um eine weite Verbreitung und Nutzung der Daten zu erleichtern, werden einige der langfristigen Beobachtungsergebnisse auf Samoilow, die global bedeutende Schlüsselvariablen sind und nach internationalen Standards durchgehend und über lange Zeiträume hinweg gemessen werden, in Datenbanken eingepflegt, die von internationalen Netzwerken und Programmen betrieben werden: Die Ergebnisse der Langzeit-Eddy-Kovarianz-Messungen von Austauschflüssen zwischen Land und Atmosphäre, die Daten zu Impulsen, Energie, Wasser, Kohlenstoffdioxid und Methan liefern (siehe Seite 76-81), wurden in das globale Netzwerk FLUXNET (Standort-ID: Ru-Sam) eingepflegt. Dieses Netzwerk verknüpft Standorte auf allen Kontinenten, die mittels Eddy-Kovarianz-Methode den Kohlenstoffdioxid- und Wasserdampfaustausch routinemäßig messen (<http://fluxnet.fluxdata.org/>).

Das Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P, <https://gtnp.arcticportal.org/>) trägt zwei Permafrost-Schlüsselvariablen als Essential Climate Variab-

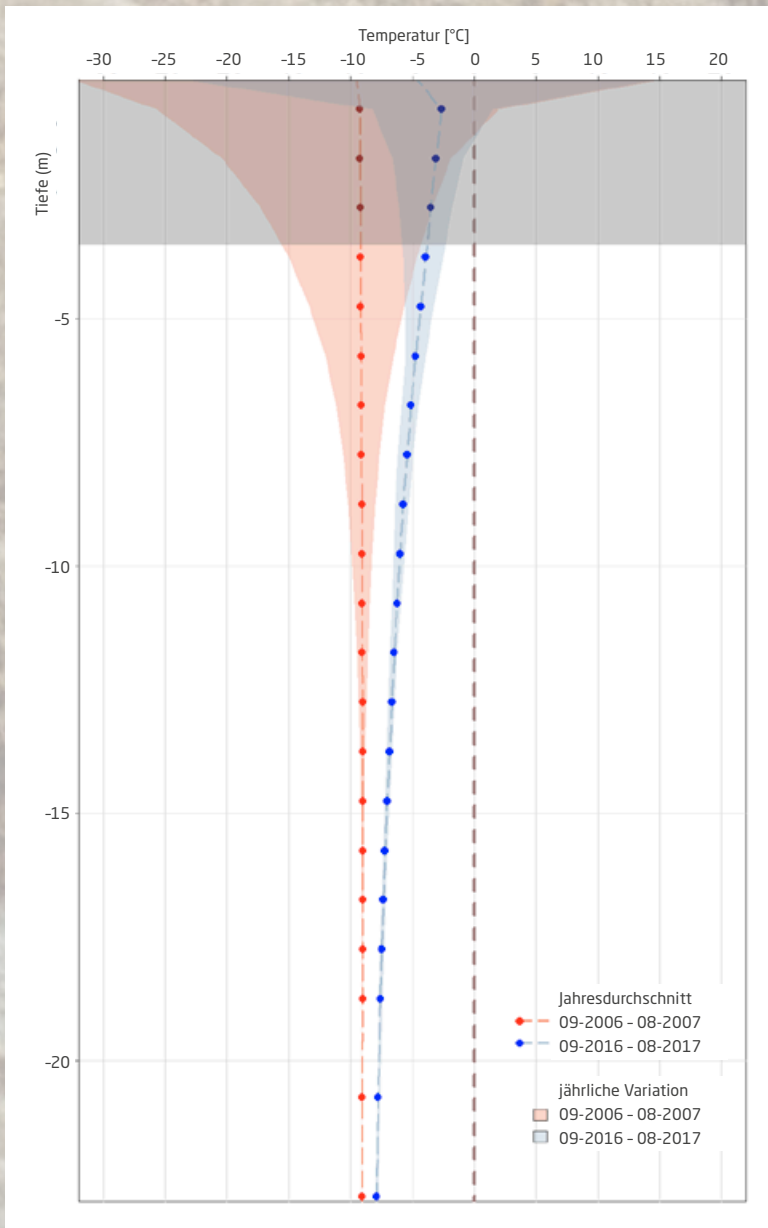


Abbildung 1: Permafrosttemperaturen, gemessen im 26 m tiefen Bohrloch auf Samoilow, zeigen eine Permafrosterwärmung zwischen 2006/07 und 2016/17 (nach Boike et al. ESSD, eingereicht).

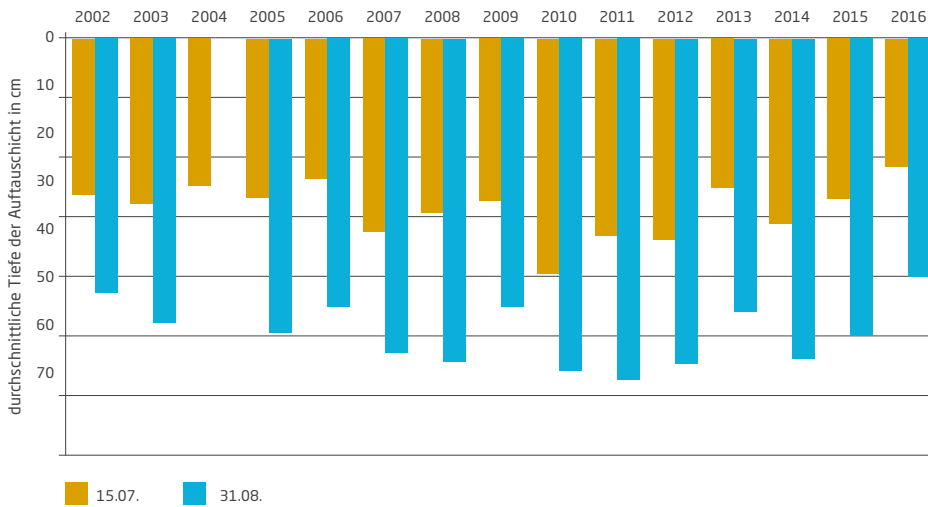


les (ECVs) zusammen. Die ECVs wurden vom Global Climate Observing System (GCOS) und dem Global Terrestrial Observing Network (GTOS) etabliert. Die erste Schlüsselvariable ist der Thermal State of Permafrost (TSP), bei dem es sich um die langfristig durch ein weitreichendes Netzwerk an Bohrstandorten in der gesamten Permafrost-Region überwachte Permafrosttemperatur handelt. Die zweite ist die Active Layer Thickness (ALT), die jährliche Auftautiefe des Permafrosts, gemessen nach Standards des Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM). Samoilow liefert Daten sowohl zu TSP als auch zu CALM.

Ein 26 m tiefes Bohrloch wurde 2006 auf Samoilow angelegt und mit einer Messkette von 24 Temperatursensoren ausgestattet, die seitdem durchgehend die Permafrosttemperatur entlang des gesamten Tiefenprofils messen (Abbildung 1). Zusätzlich zu diesem Standort auf Samoilow wurden als Teil der LENA-Expeditionen viele weitere Bohrlöcher in der gesamten Region der Laptewsee angelegt. Die in diesen Bohrlöchern gemessenen Permafrosttemperaturen werden in die TSP-Datenbank eingespeist. Durchgehende ALT-Messungen auf Samoilow begannen bereits 2002, als ein CALM-Raster angelegt wurde (siehe Seite 76-81).

Das von der EU geförderte Infrastrukturprojekt INTERACT - International Network for Terrestrial Research and Monitoring in the Arctic (<https://eu-interact.org/>) ist ein die Arktis umspannendes Netzwerk von derzeit 82 Landstandorten, inklusive

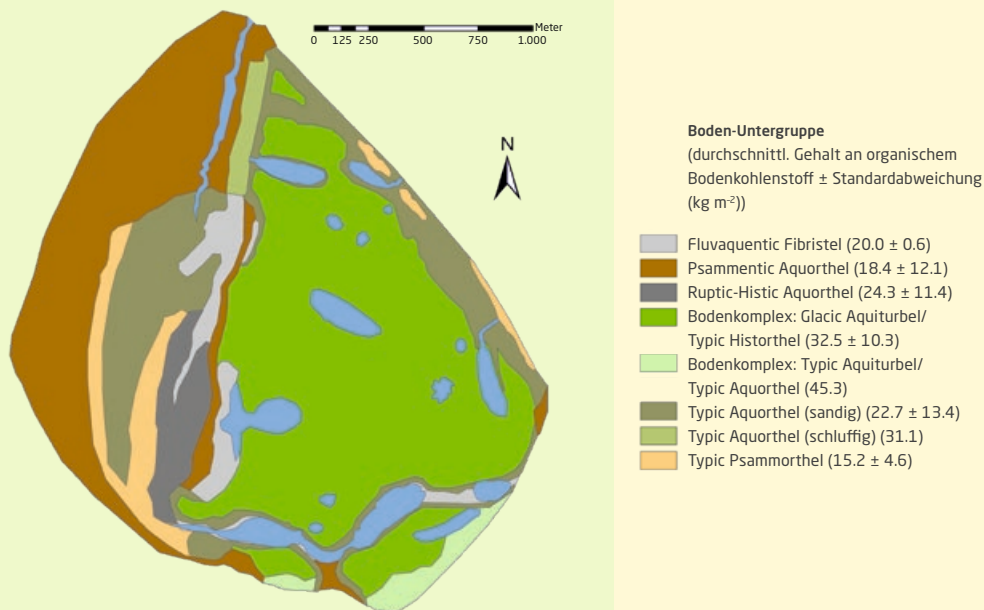
Abbildung 2: Metallrohr im Bohrloch auf Samoilow für den Zugang zur darin befindlichen Messtechnik.



Samoillow. Es konzentriert sich nicht auf das Zusammentragen und die Verbreitung von bestimmten Datensätzen, sondern ist multidisziplinär und zielt auf den Aufbau von Kapazitäten für Forschung und Beobachtung in der europäischen Arktis und darüber hinaus ab. Es bietet im Rahmen seines Transnational-Access-Programms Zugang zu zahlreichen Forschungsstationen. Zusätzlich zur zuvor erwähnten Rolle der Forschungsstation Insel Samoillow für die Bereitstellung von Daten, zieht die Möglichkeit, die Forschungsstation als wissenschaftliche und logistische Basis für Feldforschung im Lenadelta und in der Laptewsee zu nutzen, neben den russisch-deutschen Forscherteams viele externe Forscher zu Feldarbeiten auf und um Samoillow an. Das INTERACT Transnational-Access-Programm verschafft solchen internationalen Forscherteams seit 2013 Zugang zu Samoillow. Die Kooperation von INTERACT mit den Mitgliedern der russisch-deutschen LENA Expedition war sehr erfolgreich und führte zu gemeinsamen Veröffentlichungen und einer andauernden Zusammenarbeit.

*Anne Morgenstern, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Julia Boike, Lars Kutzbach*

Abbildung 3: Mittlere Auftautiefe am Saisonende gemessen an 150 Punkten im CALM-Raster (Boike et al. ESSD, in review).



## Kurzer Überblick über die russisch-deutschen Permafrost-Projekte CARBOPERM und KoPf

Die terrestrische Erforschung des Permafrost in Zusammenarbeit zwischen Russland und Deutschland wurde vor etwa 25 Jahren, während der Konferenz in Puschtschino 1992, eingeleitet. Auf der Konferenz trafen deutsche Experten für Böden und Polarregionen auf russische Geokryologen - und waren von der fantastischen Expertise zur Permafrostforschung in Russland begeistert. Seit jener Zeit nimmt der multidisziplinäre und kontinuierliche Austausch zwischen Russland und Deutschland stetig zu - hauptsächlich angetrieben vom AWI Potsdam und seinen Partnern an verschiedenen Universitäten in Deutschland.

Abbildung 1: Durchschnittliche Kohlenstoffgehalte in den verschiedenen permafrostbeeinflussten Böden (bis 1 m Tiefe) auf Samoillow als Datenbasis für interdisziplinäre Arbeit im Permafrost (Zubrzycki et al. 2013).

Es dauerte beinahe 20 Jahre, bis das erste Permafrost-Projekt mit russisch-deutscher Förderung zustande kam: CARBOPERM (BMBF/MON-Förderung 2013-2016) war ein gemeinsamer Forschungseinsatz, der Bildung, Umsatz und Freisetzung von Kohlenstoff in den Permafrostlandschaften Sibiriens untersuchte. Ziel war es, das Verständnis darüber zu verbessern, wie von Permafrost geprägte Landschaften auf globale Erwärmung reagieren und wie diese Reaktion lokale, regionale und globale Spurengasbilanzen beeinflussen wird.

Durchgehend niedrige Temperaturen im Permafrost verhinderten die Zersetzung organischen Kohlenstoffs, was wiederum dazu führte, dass permafrostbeeinflusste Böden große Mengen an organischem Kohlenstoff (OC) ansammelten. Laut jüngster Schätzungen enthielten diese Böden einmal 1670 Pg OC oder etwa 2,5 mal die Menge an organischem Kohlenstoff in der globalen Vegetation. Die Kohlenstoffgehalte auf Samoilow dienen als Beispiel in Abbildung 1.

Steigende Temperaturen in der Arktis hatten ein stärkeres Tauen des Permafrostes zur Folge, was zu einer Mobilisierung des vormals gefrorenen OC führte. Die Zersetzung des frei gewordenen OC verursachte eine erhöhte Bildung der Treibhausgase Methan und Kohlenstoffdioxid. Die steigenden Spurengaskonzentrationen in der Atmosphäre aufgrund des Permafrostauftaus bilden hierbei eine positive Rückkopplung an die Klimaerwärmung. Permafrostforscher aus Russland und Deutschland arbeiteten zusammen an wichtigen Standorten in der sibirischen Arktis wie der Großen Ljachow-Insel und der Dmitri-Laptew-Straße, dem Lenadelta und dem Kolyma-Tiefland nahe Tscherski.

CARBOPERM verstärkte die Permafrostforschung in unterrepräsentierten Regionen Sibiriens, die für internationale Forscher schwer erreichbar sind. Die gewonnenen Ergebnisse verbesserten das Verständnis um die zukünftige Entwicklung der sensiblen und ökonomisch relevanten arktischen Permafrostregionen.

Das derzeitige Permafrost-Projekt KoPf (BMBF-Förderung 2017-2021), koordiniert durch die Universität Hamburg, das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung Potsdam, das Arktische und Antarktische Forschungsinstitut (AARI) in St. Petersburg und das Melnikov Permafrost Institut (MPI), verbessert das Prozessverständnis der Effekte eines sich verändernden Klimas auf Kohlenstoff im Permafrost mittels Feldbeobachtungen, Fernerkundung und numerischen Simulationen.

Die terrestrische Permafrostforschung wird erneut in sehr enger russisch-deutscher Zusammenarbeit mit einem Fokus auf Sibirien durchgeführt. Im KoPf-Projekt werden modernste Erd-System-Modelle im Hinblick auf Prozesse



verbessert, die mit Permafrost in Verbindung stehen. Diese Modelle werden anschließend auf verschiedene Erwärmungsszenarien angewandt um zu untersuchen, wann die derzeitige arktische Kohlenstoffsene zu einer zukünftigen Kohlenstoffquelle werden wird. Weitere Ziele sind die Bestimmung der langfristigen Zersetzbarkeit von organischem Kohlenstoff im Permafrost und dessen Beitrag zu Treibhausgasflüssen. Dies wird mittels biochemischer und mikrobieller Prozessstudien der Zersetzungsfähigkeit von organischem Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid- und Methanproduktion bestimmt.

Das Projekt arbeitet auf lokalen, regionalen und kontinentalen Maßstäben und quantifiziert die Beiträge von Änderungen in der Bodenbedeckung, deren Ökosystemen und die Veränderungen der Eigenschaften von organischem Kohlenstoff in Permafrostböden als Reaktion auf die Treibhausgasdynamik. Die gewonnenen Daten werden zur weiteren Modellvalidierung verwendet. KoPf kombiniert neue Methoden der Mikrobiologie, Biogeochemie, Ökologie und Mikrometeorologie, Fernerkundung und numerischen Modellbildung, um Veränderungen im Zeitraum von 1850-2100 zu untersuchen.

Die resultierenden modellbasierten Projektionen für auftauenden Permafrost und Rückkopplungen an das Klimasystem sind unerlässlich, um geeignete Strategien zur Minderung und Anpassung auszuarbeiten.

Darüber hinaus unterstützt KoPf die Ausbildung von Nachwuchsforschern im Bereich Permafrost und stärkt das bilaterale Netzwerk zwischen Russland und Deutschland mittels Kooperationen zwischen 14 deutschen und 12 russischen Forschungseinrichtungen zu aktuellen Themen rund um Permafrost.

Sowohl CARBOPERM als auch KoPf sind die Grundlage für laufende und zukünftige Forschungsprojekte auf der Forschungsstation Insel Samoilow, die weiterhin in enger Zusammenarbeit zwischen den russischen und deutschen Freunden des Permafrost durchgeführt werden.

*Eva-Maria Pfeiffer, Hans-Wolfgang Hubberten, Mikhail N. Grigoriev, Dmitry Yu. Bolshiyonov, Sebastian Zubrzycki, Ulrike Herzsuh, Guido Grosse*

## Einsatz von Fernerkundung im Gebiet der Laptewsee

Fernerkundung bietet mit aktiven und passiven Satellitensensoren und Fluggeräten geeignete Werkzeuge für die Beobachtung und Quantifizierung von Veränderungen der terrestrischen und marinen Umwelt in den abgelegenen Regionen Nord Sibiriens. Durch die Vielfalt an Techniken und Beobachtungsobjekten ergibt sich ein weites Anwendungsspektrum, welches immer öfter auch in Kombination mit Geländemessungen und Modellierung umgesetzt wird. Fernerkundung wurde innerhalb der russisch-deutschen Kooperation in der Lenadelta-Region eingesetzt, um Meereis und Gewässerqualität, Landbedeckung und deren Veränderung, vielfältige Thermokarst- und Thermo-Erosionsformen, Küstenerosion, Treibhausgasflüsse, Permafrost-Tauen, sowie Veränderungen arktischer Seen und von Seeeis zu charakterisieren.

### Meereis, Ozean und Küste

Die Analysen von optischen und Radar-Satellitendaten zeigen, dass die flachen Schelfe der sibirischen Arktis eine bedeutende Quellregion für im Meereis enthaltene Sedimente sind und eine wichtige Rolle für die Aufnahme, Umverteilung und Verbreitung von Sedimenten, Nährstoffen und Schadstoffen spielen. Deren Einbau in das Meereis erfolgt vor allem durch das Gefrieren von Suspensionen im Eisbrei der flachen Küstengewässern. Die Transpolare Drift transportiert das partikelbeladene Meereis dann über das zentrale arktische Tiefseebecken in Richtung Framstrasse, wo es den Arktischen Ozean verlässt und zu schmelzen beginnt.

Russisch-Deutsche Forschungskoperationen untersuchten den Rückzug des Meereises im Sommer und den Einfluss auf die Produktion, Mächtigkeit und Dynamik des Meereises in der Laptewsee. Eine Kombination aus Luftbildaufnahmen und optischen, thermischen und Radarbild-Daten wurde verwendet, um die Eisproduktion und die Auswirkungen auf die lokale Hydrographie in der Laptewsee zu quantifizieren. Auf diese Weise wurden auch die zwischenjährige Variabilität und die zeitliche Entwicklung der Festeis- und Packeisbedeckung untersucht. Informationen zur Meereis-Drift, die aus Passiven Mikrowellen-Satellitendaten abgeleitet werden kann, zeigen einen signifikanten Anstieg der Driftgeschwindigkeiten und des Meereis-Exports. Der Anstieg des Meereis-Exports führt zu einer Verdünnung der Meereisdecke, was wiederum zu einem früheren Eisrückgang während der Sommermonate führt. Darüber hinaus beschleunigen die sich verändernde Eisdynamik im Winter auch den Rückzug des Festeises. Aus diesen Gründen ist ein Verständnis der Meereisdynamik in der Laptewsee unerlässlich, um die Zukunft des arktischen Meereis-Systems vorhersagen zu können.

Während der wenigen meereisfreien Sommermonate ermöglicht optische Fernerkundung die Beobachtung von Veränderungen der Hydrographie und Turbidität

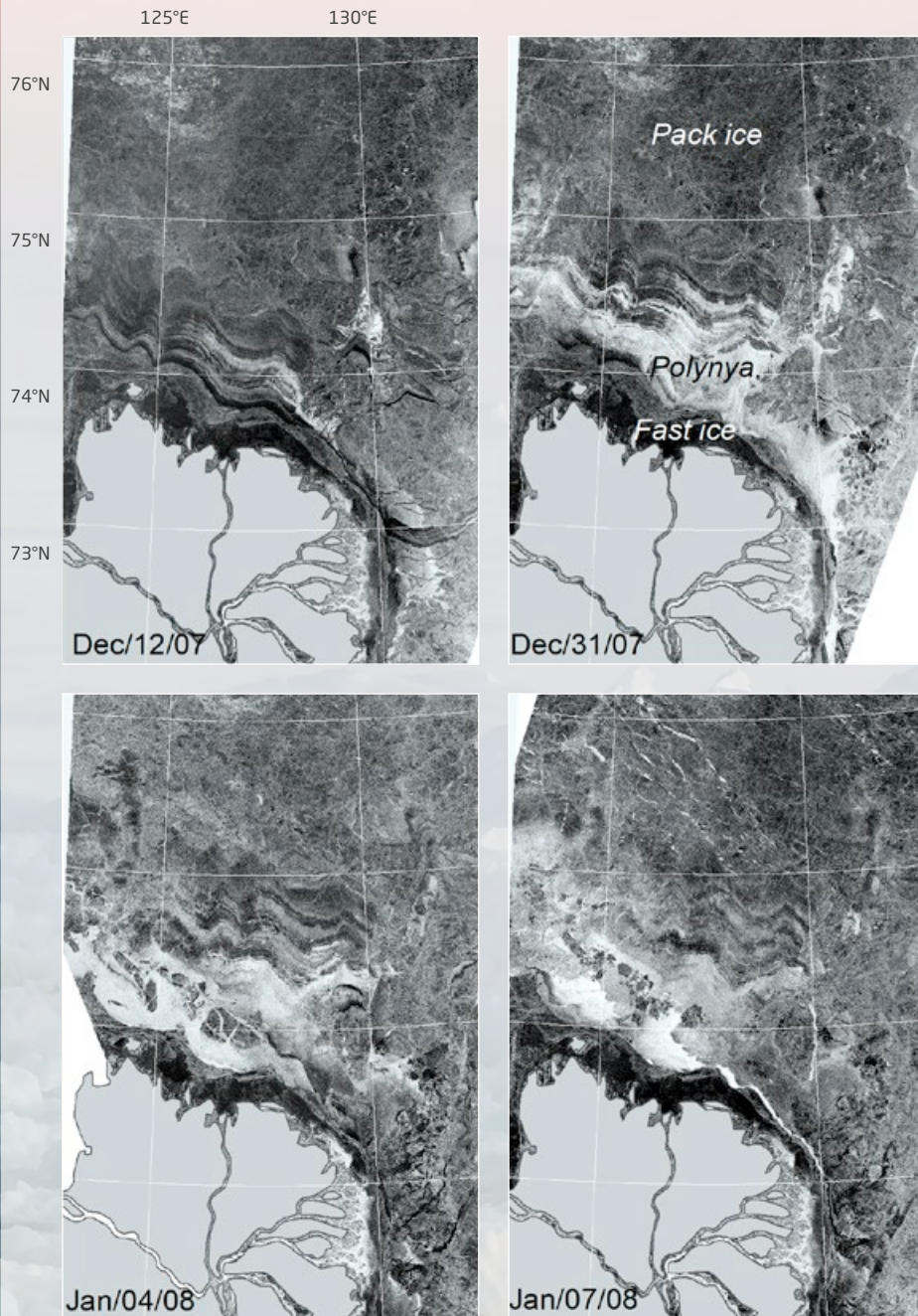


Abbildung 1: Meereis-Dynamik, beobachtet mit ENVISAT SAR im Winter 2007/2008, nördlich des Lenadeltas (Pack ice - Packeis; Polynya - Polynja; Fast ice - Festeis).

der Laptewsee. In der Laptewsee ist der Eintrag von organischem Material durch die großen Flusssysteme und die Küstenerosion am höchsten in der Arktis. Der hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff im Oberflächenwasser ist der Grund für eine mehr als Zehnfach zu hohe Überschätzung der aus Fernerkundung abgeleiteten Chlorophyll-Datenprodukte. Laufende Arbeiten an neuen Algorithmen, die an die Bedingungen der Laptewsee angepasst werden, ermöglichen die Ableitung angemessener Konzentrationen für Chlorophyll und gelöster organischer Stoffe. Im Gebiet der Laptewsee wandeln Überflutung und die Erosion von Permafrostküsten Landflächen zu Meerflächen um. Fernerkundung mittels hochaufgelöster Satellitenbilder und historischer Luftaufnahmen ermöglichen genaue Messungen des Rückgangs der Permafrost Küstenlinien.

### **Zustand und Veränderungen der Landoberfläche**

Es wurden schon verschiedene Klassifikationen der Landbedeckung für das Lenadelta-Gebiet erstellt. Vor allem Landsat-Daten wurden intensiv genutzt um durch schnelles Permafrostauftauen entstandene Landformen wie Thermokarstseen und -senken sowie Thermo-erosionstäler zu kartieren.

In vielen Regionen prägen solche Landformen mehr als 50 % der Landschaft. Jüngere (2002-2013) hochauflösende Satellitendaten mit einer Auflösung von 5 m und besser wurden eingesetzt, um auch die Unmengen kleinerer Schmelztümpeln im Lenadelta zu inventarisieren. Darauf basierend stieg der gesamte bekannte Wasserflächenanteil des Lenadeltas von 13% auf 20 % an.

Geländespektrometermessungen von Landoberflächen unterstützen die Unterscheidung von Vegetationstypen und verbesserten die Klassifikation von multispektralen Satellitendaten. Durch das Internationalen Polarjahr (2007-2008) standen vermehrt Aufnahmen von verschiedenen Satellitenmissionen für das Lenadelta zur Verfügung. Ein detailliertes, digitales ALOS-PRISM Höhenmodell ermöglichte die Kartierung des von Thermokarst geprägten Yedoma-Reliefs sowie die Identifizierung von Gebieten mit eisreichem Permafrost, in denen sich zukünftig Thermokarst ausbilden kann, für die Insel Kurungnach im zentralen Lenadelta. Parallel dazu wurden Landbedeckungstypen klassifiziert, um mittels multispektraler ALOS-AVNIR Daten Feuchtigkeitregime, Vegetationsbedeckung und -zusammensetzung zu charakterisieren.

Hochautomatisierte Datenverarbeitungsverfahren, die den gesamten Landsat-Datensatz von 1999-2014 mit einbeziehen, erlauben nun detaillierte Einblicke in die Dynamik des Lenadeltas, inklusive von Flussufer-Erosion, Wandern der Sandbänke, Vegetationsänderungen, ansteigender Feuchte oder Trockenheit der Landoberflächen und die Veränderung von Thermokarstseen.

Eine mit einer wissenschaftlichen Flugdrohne in 2016 durchgeführte Messkampagne vom Trofimuk-Institute für Erdöl-Gas-Geologie und Geophysik in Novosibirsk resultierte in ein Bildmosaik aus sehr hoch aufgelösten Luftaufnahmen und digitalen Höhenmodelldaten für Samoillow und das südliche Kurungnach. Aufbauend auf diesen Datensatz ermöglichen nun detailliert erstellte Karten von Vegetationsgemeinschaften und Geomorphologie ein besseres Verständnis der Verbindung von Geomorphologie und Vegetation in Tundrenlandschaften.

Eine Übertragung von Methanemissionsmessungen auf das gesamte Delta mit Hilfe von verschiedenen aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Landbeckungsklassen ergab, dass das Lenadelta etwa 0.03 Tg Methan pro Jahr emittiert. In 2014 mit Helikopterflügen durchgeführte Methanflussmessungen verknüpfen großräumige Muster der Treibhausgasemissionen mit detaillierten Daten eines Eddy-Kovarianz-Messturms auf Samoillow.

Um räumliche und zeitliche Variationen der Oberflächentemperaturen in der feuchten polygonalen Tundra im Sommer besser zu verstehen, wurden Temperaturdaten der Landoberfläche vom MODIS-Satelliteninstrument mit Messungen einer bodennahen Wärmebildkamera auf Samoillow verglichen. Die Ergebnisse führten zu Empfehlungen für die Verbesserung satellitengestützter Temperaturalgorithmen für Tundrenlandschaften. Ausserdem wurden satellitengestützte Temperaturdaten der Landoberflächen in Kombination mit aus Satellitendaten abgeleiteten Informationen zum Äquivalenzwassergehalt von Schnee eingesetzt, um numerische Modelle von Permafrosttemperatur und Auftauschichtdynamik Lenadelta anzutreiben.

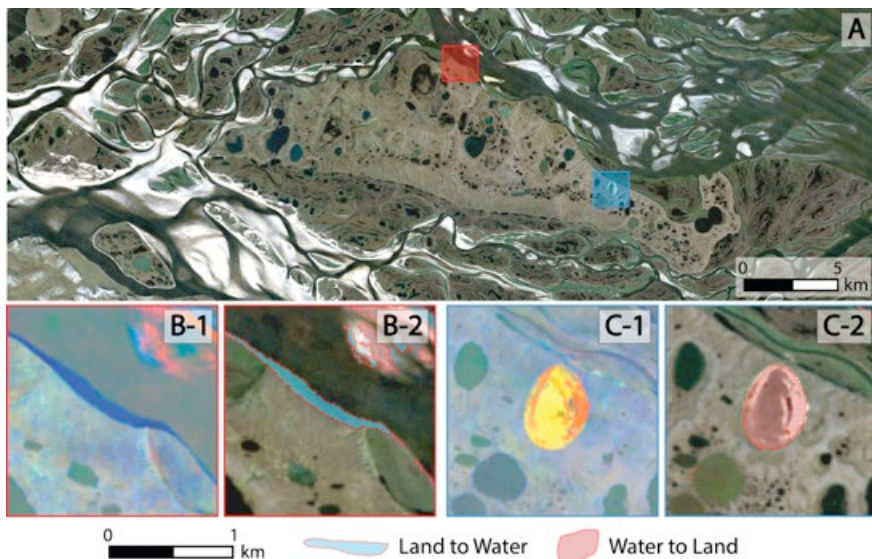


Abbildung 2: Landsat-Daten (1999-2014) weisen auf eine starke Ufererosion und das Auslaufen von Seen im Lenadelta hin.

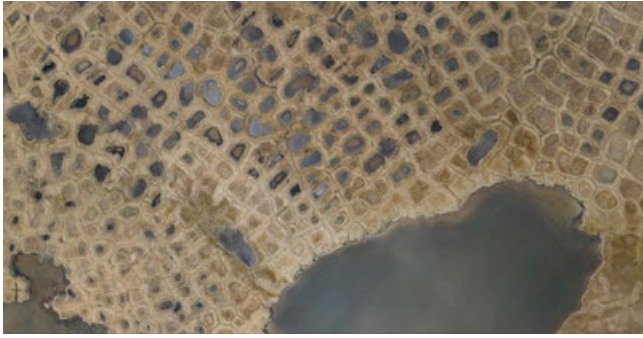


Abbildung 3:  
Hochauflösendes Bild  
einer wissenschaftlichen  
Flugdrohne von Eiskeil-  
Polygonen auf Samoilow.

Die wolkendurchdringende Fernerkundung mittels aktiver Mikrowellen mit Synthetic-Aperture Radar (SAR)-Systemen kann die Beobachtungseinschränkungen aufgrund der regelmässig auftretenden Wolkenbedeckung in den arktischen Sommermonaten überwinden. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ermöglichte eine kontinuierlich laufende Datenerhebung von TerraSAR-X-Aufnahmen des Lenadeltas die genaue Bestimmung der schnellen Erosionsraten von Uferlinien, sowie die Beobachtung der Eisentwicklung auf Thermokarstseen und den Ablauf der Eisschmelze mit einer beispiellosen Präzision. Differentielle SAR-Interferometrie mit TerraSAR-X- und Sentinel-1-Daten wurde angewandt, um die saisonale Entwicklung der Auftautiefe auf den Yedomafächen im Lenadelta zu quantifizieren.

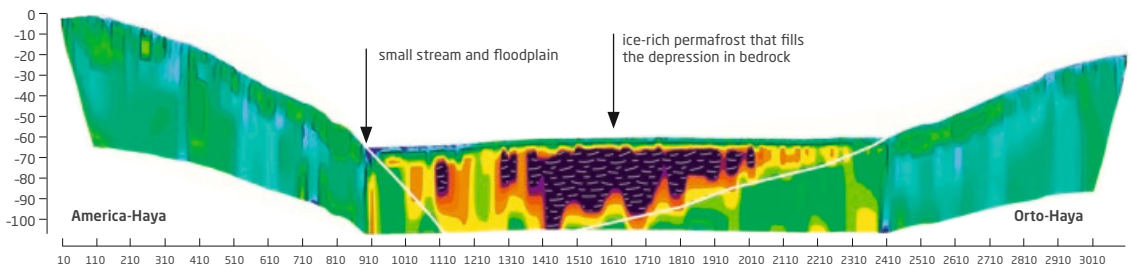
Stereophotogrammetrische Messungen der Oberflächenveränderung durch Absenkung infolge von Permafrosttauen auf der Insel Muostach weisen auf ein Absinken der Oberfläche um mehrere Meter im Zeitraum von 1951 bis 2013 hin. Bodengestützte Lasermessungen wurden eingesetzt um die Veränderungen der Oberflächehöhe zu untersuchen und die wiederholten Messungen zeigen eine interessante mehrjährige Dynamik von Absenkung und Frosthebung.

### **Ausblick**

Die Fernerkundung liefert neue und umfassende Erkenntnisse zum Zustand und Dynamik des Lenadeltas und der Laptevsee in den letzten Jahrzehnten. Die Fernerkundung spielt außerdem eine wichtige Rolle bei der Planung von Geländeaktivitäten, der Skalierung von Geländemessungen, der Parametrisierung und Evaluierung von Modellen sowie für das Testen von Hypothesen zu Prozessen, die durch den Klimawandel verändert werden.

Geländemessungen, die während der Expeditionen erhoben werden, liefern einen kritischen Beitrag zur Datenanalyse und -Interpretation für fast alle Fernerkundungsstudien. Dies unterstreicht die Wichtigkeit eines direkten Zugangs zu den zu erforschenden Gebieten in diesen Regionen sowie die Bedeutung einer gut ausgestatteten Forschungsstation im Lenadelta als logistisches Basislager.

*Guido Grosse, Birgit Heim, Sofia Antonova, Julia Boike, Astrid Bracher, Alexey N. Fague, Frank Günther, Thomas Krumpen, Moritz Langer, Anne Morgenstern, Sina Muster, Ingmar Nitze, Torsten Sachs*



## Multidisziplinäre Studien auf Samoillow und Kurungnach: Geophysik, Fernerkundung, Geologie sowie botanische und Bodenstudien

2013 wurde die neue Forschungsstation Insel Samoillow unter die Aufsicht des IPGG gestellt. Seit 2014 organisiert das IPGG jedes Jahr eine multidisziplinäre Expedition mit Wissenschaftlern verschiedener Forschungseinrichtungen des Sibirische Zweigs der Russischen Akademie der Wissenschaften (SB RAS). 2014 bestand die Expedition lediglich aus sechs Teilnehmern – fünf Geophysikern und einem Geologen. Die erste Expedition des IPGG begann mit einem guten Zeichen: Als der Helikopter auf Samoillow landete und die Gruppe begann, die Fracht zu entladen, sprang eines der Expeditionsmitglieder heraus und rannte zu einer jungen Frau, die in der Begrüßungsgruppe stand, um diese zu umarmen. Es stellte sich heraus, dass die beiden sich aus ihrer Studienzeit in Nowosibirsk kannten. Nach ihrem Abschluss war sie nach Deutschland gezogen, um am AWI zu promovieren. Die beiden hatten sich mehr als fünf Jahre lang nicht gesehen und nun hatte es das Schicksal eingerichtet, dass sie sich auf einer sehr abgelegenen Insel, 2800 km von Nowosibirsk und 5200 km von Potsdam entfernt wiedersehen sollten. Wie hoch sind die Chancen? Seit diesem Zeitpunkt werden die Expedition und unsere Kooperation mit internationalen Kollegen regelmäßig als „ein glücklicher Zufall“ beschrieben. Das IPGG arbeitete hart daran, seine Präsenz auf Samoillow auszubauen und 2017 war die Expedition auf 16 Teilnehmer angewachsen. Unter ihnen befanden sich Wissenschaftler aus den Bereichen der Geophysik, Geologie, Paläomagnetik, Geobotanik und Bodenkunde sowie einige Studenten der Staatlichen Universität Nowosibirsk.

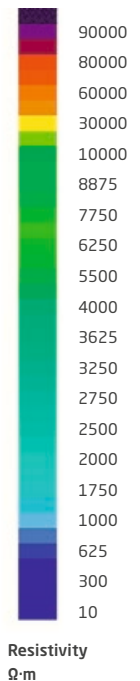
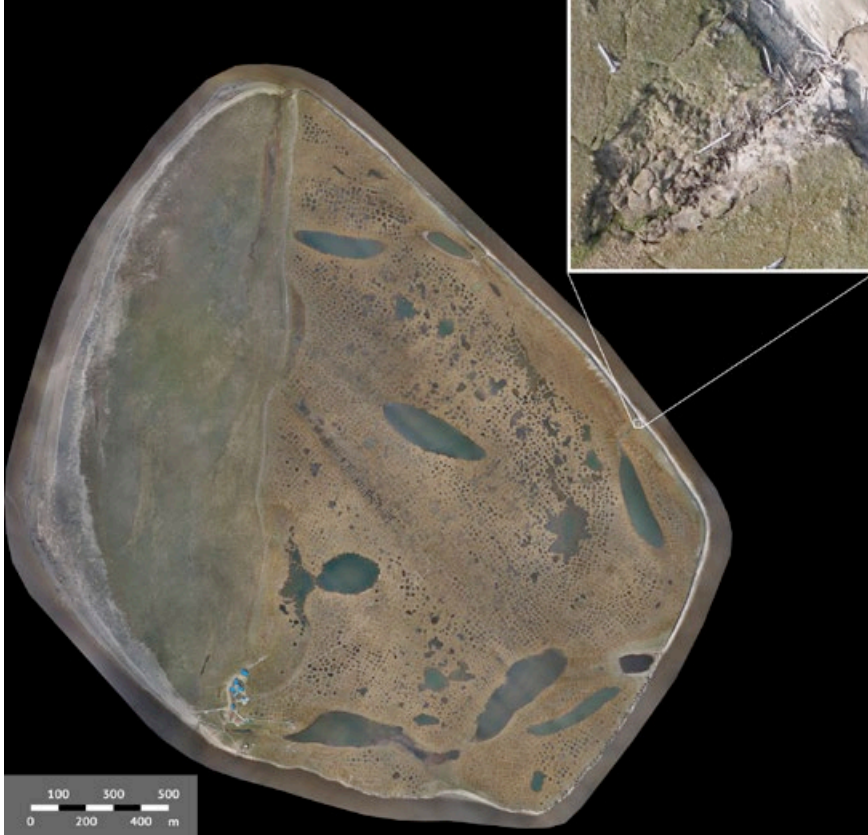


Abbildung 1: Querschnitt, rekonstruiert aus Daten elektrischer Widerstandstomographie, die entlang des Profils zwischen den Bergen America-Haya und Orto-Haya erhoben wurden. Der Querschnitt zeigt den Felsuntergrund (weiße Linie) überlagert von Sedimenten des Quartärs.



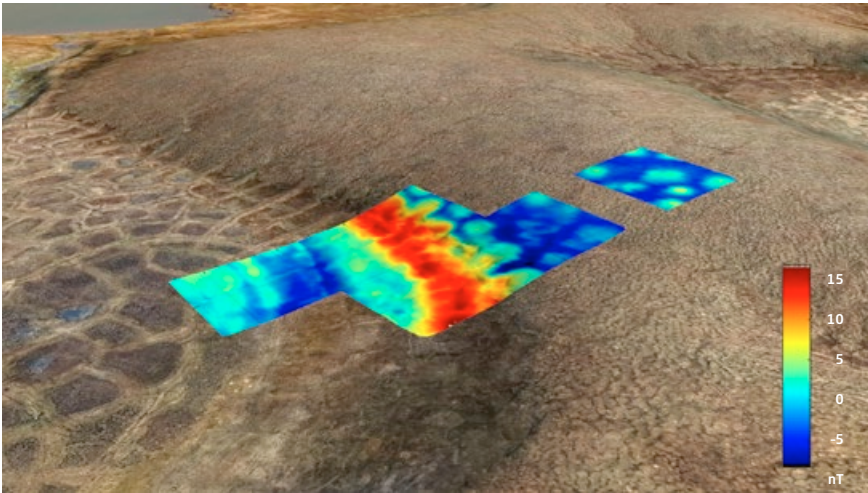
In den 4 Jahren seit dem Beginn sammelten wir auf diesen Expeditionen einzigartige Daten der Permafroststruktur mittels geophysischer Methoden. Wir wandten innovative elektrische Methoden (elektrische Widerstandstomographie) an und untersuchten die Permafrostdegradation unterhalb von Thermokarstseen sowie relictische Taliks in Alasen. Wir beprobten die auftauende Yedomasedimente enthaltende Permafrostschicht unter dem Schelf der Laptewsee.

Wir kombinierten unsere Daten mit den Daten unserer deutschen Kollegen und schafften es, einen elektrischen Querschnitt von der Landoberfläche bis zur den marinen Ablagerungen zu erstellen. Dies ermöglichte es uns, Muster der Permafrostdegradation in einem Szenario des Übergangs vom Meer zum Festland nachzuvollziehen. Eine weitere geophysische Technik - eine hochpräzise magnetische Vermessung - half uns dabei, Eiskeile zu kartieren, die normalerweise durch eine Moos- und Bodenschicht verdeckt sind.

2016 führten wir erfolgreich eine, auf Messungen mit einem unbemannten Fluggerät (UAV) gestützte, Untersuchung von Samoilow und dem südlichen Teil von Kurungnach durch. Die Untersuchungsergebnisse werden nun in detaillierten Orthofoto-Karten (0,05 m Pixel) und digitalen Höhenmodellen (0,25 m absolute Höhenpräzision; horizontale Rasterschritte von 0,5 m) präsentiert. Diese Daten eröffnen neue Möglichkeiten für künftige Studien in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft.

Abbildung 2: Orthofoto-Karte von Samoilow, erstellt aus Daten, die in einer UAV-gestützten Messung erhoben wurden. Ein Ausschnitt in voller Auflösung ist in der oberen rechten Ecke zu sehen.





Botanische Studien, die wir 2017 durchführten, haben bereits fantastische Ergebnisse hervorgebracht. Wir erstellten nicht nur die detaillierteste botanische Karte von Samoillow, sondern arbeiteten auch mit Geologen zusammen, um basierend auf Luftbilddaten eine geobotanische Klassifizierung von Samoillow und einem Gebiet auf Kurungnach zu erstellen. Dieses, auf extrem hochauflösenden Fernerkundungsdaten basierende neue Feld der Geobotanik, verspricht neue, erstaunliche Entdeckungen in Permafroststudien.

Geologische Daten, die wir 2017 erhoben, ermöglichen es uns, neue Erkenntnisse zum bereits bestehenden Verständnis der Geschichte des Quartärs im Lena-delta hinzuzufügen. Die paläomagnetische Vermessung präsentiert neue Fakten über die alte Geschichte des Deltas und des Kontinents im Allgemeinen. Wir planen, die multidisziplinäre Herangehensweise weiter auszubauen: Ziel ist es, die verschiedenen Forschungseinrichtungen des SB RAS in die Permafrostforschung einzubeziehen. Es gibt derzeit jedoch ein weiteres enormes Feld, an dem wir zusammen arbeiten: der SB RAS, das Alfred-Wegener-Institut und andere internationale wissenschaftliche Organisationen haben eine multidisziplinäre Kooperation aufgebaut, um die nächsten 20 Jahre an Lena-Expeditionen auf der Forschungsstation Insel Samoillow durchzuführen.

*Igor N. Yeltsov, Alexey N. Faguet, Leonid V. Tsibizov, Vladimir A. Kashirtsev, Vladimir V. Olenchenko, Andrey A. Kartoziya, Nikolay N. Lashchinskiy*

Abbildung 3: Karte des anomalen Magnetfeldes mit klar erkennbarem Eiskeilmuster. Die Karte basiert auf hochpräzisen Magnetmessungsdaten und ist über dem Terrainmodell dargestellt, das aus Ergebnissen der UAV-Bildgebung erstellt wurde.



## Terrestrische Permafrost-Bohrkampagnen: Tiefe Einblicke in die Vergangenheit

Permafrosttauen hat Auswirkungen auf Klima, Landoberflächen, Küsten- und Flussuferstrukturen. Die eisreichen Permafrostböden im Lenadelta laufen Gefahr sich durch das Tauen abzusenken. Zwei Hauptfaktoren der möglichen Oberflächensenkung sind die sedimentologische Zusammensetzung einschließlich des Eisgehalts und der Temperaturzustand des Permafrosts. Diese Oberflächendestabilisierung wird klimarelevant, weil eine mögliche sich selbst verstärkende Rückkopplung durch tiefes Permafrost-Tauen möglich ist. Diese Rückkopplung funktioniert über die Freisetzung von im Permafrost eingeschlossenen Treibhausgasen (siehe Seiten 68-70), sowie durch die Freisetzung von bisher eingefrorenem altem Kohlenstoff durch mikrobielle Zersetzung (siehe Seiten 117-119). Vor diesem Hintergrund waren die Ziele unserer Bohrkampagnen tiefe (>5m) gefrorene und ungefrorene Sedimentkerne einschließlich Sedimente, Eis und organische Bestandteile zu erbohren. Wir analysierten diese Kerne um die Geologie und Kryostratigraphie des Lenadeltas und benachbarter Regionen, die Eigenschaften und Mengen des tieferen Kohlenstoff, die Sedimentmächtigkeiten und Permafrostbedingungen sowie die Umweltgeschichte dieser Regionen zu verstehen (Abbildung 1). Wir nutzten den tiefen Permafrost als Fenster in die Vergangenheit, das benötigt wird, um die heutigen Bedingungen zu verstehen und die Veränderungen in einer sich erwärmenden Zukunft zu bewerten.

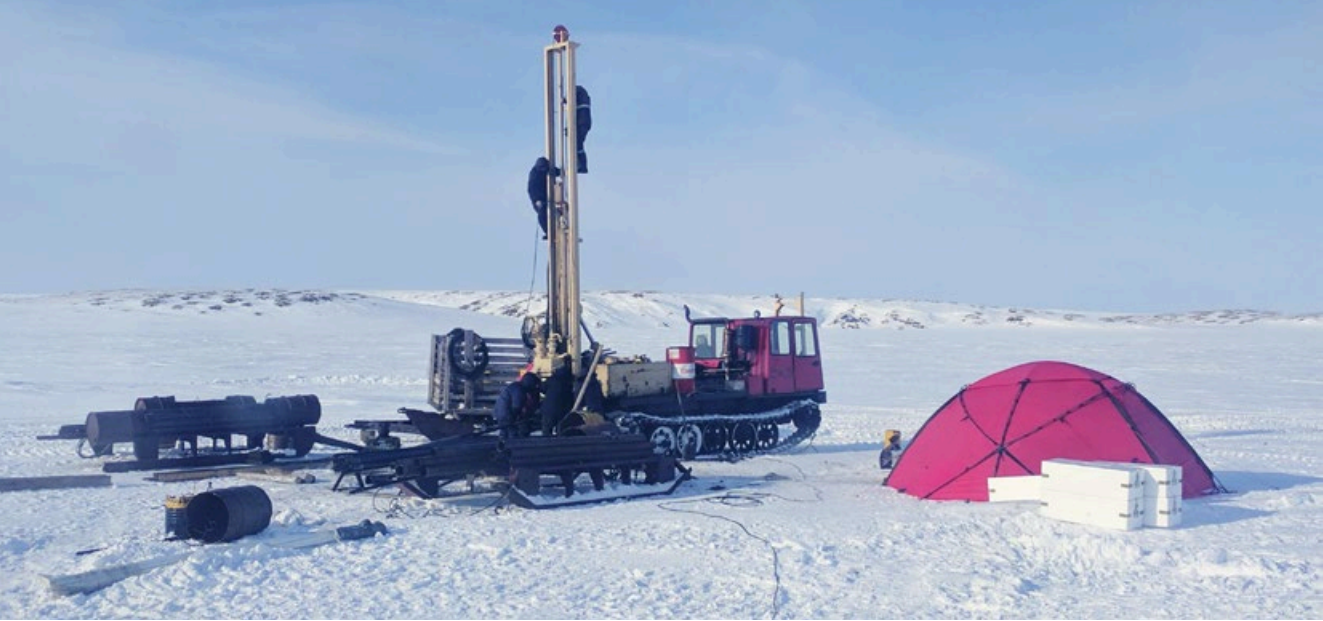


Abbildung 1: Standorte, an denen wir tief in den Permafrost und die ungefrorenen Sedimente bohrten, um tiefe Einblicke in die Vergangenheit zu erlangen. Standorte umfassen die Große Ljachow-Insel, (2014, N73.33, E141.32), die Buor-Chaja-Halbinsel (2012, N71.4203, E132.111), die Bykowski-Halbinsel (2017, N71.7452, E129.3022) sowie die Inseln Kurungnakh (2015, N72.2903, E126.1843), Mamontovy Klyk (2005, N73.60597, E117.17736), Samoilow (2005 und 2018, N72.3766, E126.4816), Sardach (1998, 2009 N72.571544, E127.241499) und Turakh (2005, N72.9740, E123.7986). Karte erstellt von S. Laboor.



Verschiedene wissenschaftliche Disziplinen sind an der Forschung beteiligt einschließlich Geokryologie, Sedimentologie, Paläoökologie, Biologie, Geophysik und Geochemie. Derartige Bohrexpeditionen werden hauptsächlich während des arktischen Frühlings durchgeführt, wenn die großen und schweren Bohrgeräte leichter über gefrorene Tundra und Gewässer transportiert werden können. Auch die Bohrkern selbst bleiben dadurch gefroren. Das Expeditionsleben und die Arbeit unter Bedingungen von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und potenziellem Risiko von Schneestürmen und Eisbärenbegegnungen sind eine Herausforderung. Gute logistische Vorbereitung und langjährige Erfahrung sowohl bei den russischen als auch den deutschen Expeditionsorganisatoren ermöglichen solche Expeditionen. Innerhalb des sehr guten logistischen Rahmens der Lena-Expeditionen ähneln diese Feldlager oft

Abbildung 2: Im Frühling wird während einer Bohrexpedition in Nordsibirien den rauen arktischen Temperaturen getrotzt: ein kleines, temporäres Lager auf Schlitten mit einer Kantine, einem Generatorschlitten, zwei zweistöckigen Häusern und dem Bohrgerät (von links nach rechts).



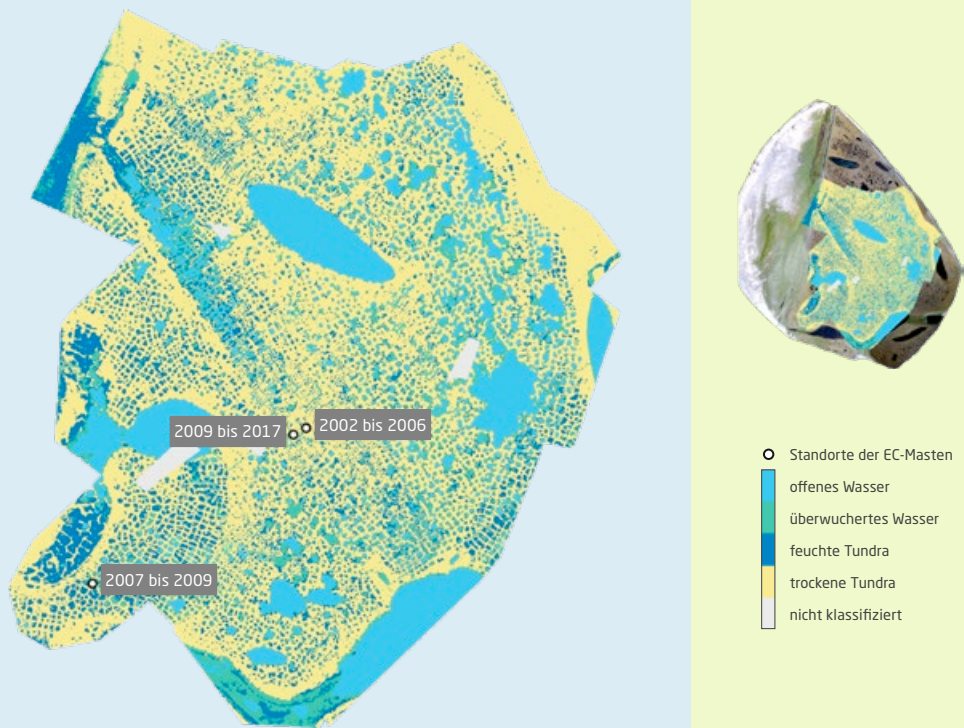
kleinen Siedlungen auf Schlitten, die je nach wissenschaftlicher Fragestellung und Anforderung zu neuen Einsatzgebieten umziehen können (Abbildung 2).

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Feldlogistik ist das Bohrgerät selbst. Die technischen Möglichkeiten im Rahmen der Lena Expedition sind auch hier hervorragend: Für die Expeditionen stehen verschiedene Arten von Bohrgeräten zur Verfügung, um Kerne aus verschiedenen Landschaftseinheiten, in verschiedenen Tiefen und in unterschiedlichen Sedimenten zu gewinnen. In den meisten Fällen wurden URB2-4T-Bohrgeräte für Permafrost verwendet (Abbildung 3), da sie für Bohrungen tiefer als 20 m geeignet sind und sich oftmals bewährt haben. Ein anderes oft verwendetes System ist der KMB-Bohrer für Kerne bis zu 20 m Tiefe, der kleiner ist, aber mit einem MI-8 Helikopter oder einem Kettenfahrzeug (Vezdekhod) transportiert werden kann.

Ein über 60m tiefes Bohrloch wurde im April 2018 auf der Insel Samoillow gebohrt. In der Zukunft wird dieses Bohrloch uns die einzigartige Möglichkeit bieten, langfristige Temperaturbeobachtungen durchzuführen, die den Einfluss der arktischen Erwärmung auf tiefe Permafrost-Sedimente aufdecken und uns eine Vorstellung davon geben, wie lange das Permafrost-Erbe der letzten Eiszeit noch die Landschaft prägen wird.

*Jens Strauss, Mikhail N. Grigoriev, Paul Overduin, Georgii Maximov, Guido Grosse, Alexey N. Fague, Leonid Tsibizov, Lutz Schirrmeister*

Abbildung 3: Bohrgerät in Betrieb: Starten der URB2-4T Bohranlage für eine Tiefbohrung auf der Bykowski-Halbinsel, April 2017. (Foto: J. Strauss)

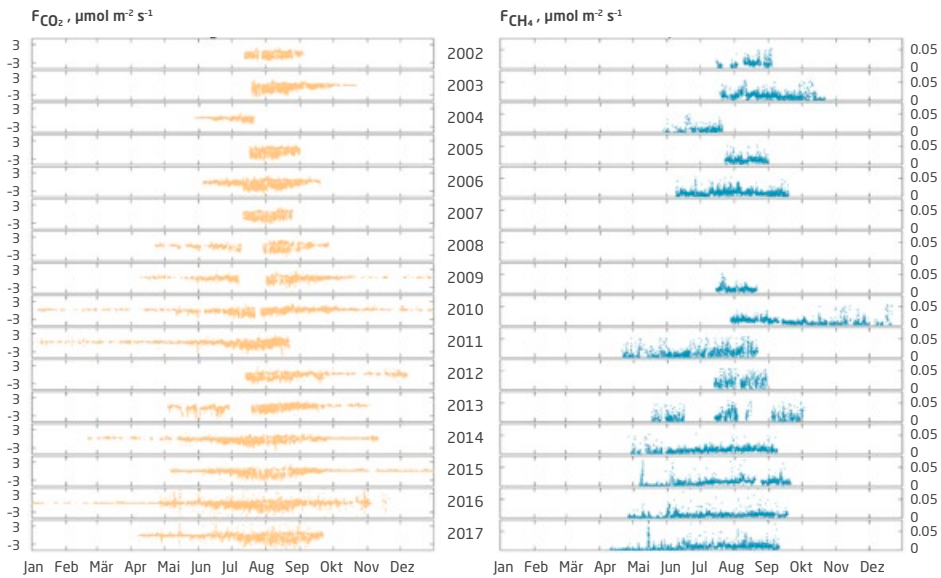


## Langzeitmessungen der Energie-, Wasser-, und Treibhausgasflüsse zwischen Land und Atmosphäre von 2002 bis heute und darüber hinaus

Wasserdampf-, Kohlenstoffdioxid- und Methanflüsse werden seit 2002 mittels der Technik der Eddy-Kovarianz gemessen. Veränderungen in hydrologischen Bedingungen, Messtechnik und der verfügbaren Arbeitskräfte sowie Veränderungen in der finanziellen und logistischen Unterstützung führten zu vier verschiedenen Masteinrichtungen an drei verschiedenen Standorten auf der Insel (siehe Abbildung 1). Häufige Variationen in der Messeinrichtung beschränken sich jedoch auf die ersten Jahre. Das System ist seit 2009 am selben Standort in der Mitte der Flussterrasse der Insel installiert. Obwohl verschiedene Maststrukturen verwendet wurden, wurde die Messhöhe von 4,15 m durchgehend beibehalten.

Die hochauflösenden (20 Hz) Gaskonzentrations- und 3D-Windgeschwindigkeitsdaten, die mit dem EC-System aufgenommen werden, ergeben nach der Datenaufbereitung Zeitreihen der Gasflüsse in halbstündigen Abständen, die die räumlich integrierten Austauschflüsse zwischen Oberfläche und Atmosphäre im Landschaftsmaßstab wiedergeben. In Bezug auf Kohlenstoffdioxid- und Methanflüsse können diese Daten eingesetzt werden, um Bilanzen an robustem Kohlenstoff (C) zu erstellen, was wiederum die Quantifizierung der Stärke der

Abbildung 1: Verteilung von Oberflächenklassen und Standorte des Eddy Covariance (EC)-Masts in der zentralen Flussterrasse auf Samoilow.



Flussterrasse als C-Senke ermöglicht. Diese kumulativen Daten zu Gasflüssen sind besonders wertvoll, wenn sie für mehrere Jahre verfügbar sind, da so Beziehungen zu den Einflussfaktoren der Flüsse und sich verändernden Umweltbedingungen aufgedeckt werden können. Bestrebungen, dieses Ziel zu erreichen sind andauernd und gliedern sich in zwei Teilbereiche. Die Modellbildung von Flüssen kann vor Ort mittels Messungen von zusätzliche Boden- und meteorologischen Größen erfolgen, um ein Prozessverständnis zu erlangen. Sie kann auch mittels Datenprodukten der Fernerkundung erfolgen, um eine Hochskalierung auf die regionale Ebene zu ermöglichen. Abbildung 2 gibt einen Überblick über den einzigartigen Datensatz von  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Flüssen, die während der 16 Expeditionen zum Lenadelta von 2002 bis 2017 mit dem EC-System gemessen wurden.

Nahe dem 2016 installierten, 10 m hohen Forschungsmast, wurde 2017 ein besonders windschnittiges Iglu-Feldlabor auf einer Holzplattform aufgestellt (Abbildung 3). Das Iglu, der Mast und der Holzsteg werden durch das Infrastrukturprojekt ACROSS (Advanced Remote Sensing- Ground Truth Demo and Test Facilities) gefördert. Diese Einrichtungen werden die Erhebung von Feldvergleichsdaten ermöglichen, welche Umweltvariablen in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Größenordnungen und Umweltbereichen abdecken. Das Iglu kann Hochpräzisionsinstrumente bei konstanten Temperaturbedingungen beherbergen. Die Glasfaserkonstruktion wurde von innen zusätzlich isoliert und der

Abbildung 2: Treibhausgasflüsse:  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Flüsse, gemessen von 2002 bis 2017 mit der Eddy-Kovarianz-Station auf Samoillow.



Innenraum wird durch ein zusätzliches Heiz- und Kühlsystem klimatisiert. Das Iglu ist an die Hauptstromversorgung der Forschungsstation Insel Samoilow angeschlossen, was das ganze Jahr über eine durchgehende Stromversorgung, sogar unter extremen Wetterbedingungen, sicherstellt.

Die Fortführung der Langzeitmessungen von meteorologischen und Land-Atmosphäre-Flussdatenreihen (Energie-,  $H_2O$ -,  $CO_2$ - und  $CH_4$ -Flüsse) ist wichtig für die Analyse der Variabilität innerhalb eines Jahres und zwischen verschiedenen Jahren sowie für die Bilanzierung der Daten von Kohlenstoff-, Wasser- und Wärmeflüssen zwischen Permafrostböden, Vegetation und Landoberfläche. Die Daten werden in internationale Datenbanken wie FLUXNET und PANGAEA eingepflegt werden. Ähnlich wie die Langzeitbeobachtungen aus dem Samoilow-Observatorium zu Boden und Klimadaten (siehe Seite 76-81), werden diese Daten eingesetzt, um i.) Reaktionen auf Einflussfaktoren von Veränderungen im Ökosystem zu quantifizieren, ii.) komplexe Prozesse des Ökosystems zu verstehen, die sich über längere Zeiträume abspielen und iii.) Erdsystem- und Landoberflächenmodelle zu parametrisieren und zu validieren.

*David Holl, Julia Boike, Torsten Sachs, Peter Schreiber, Niko Bornemann, Christian Wille, Eva-Maria Pfeiffer, Irina V. Fedorova, Lars Kutzbach*

Abbildung 3: Neue, klimatisierte Beobachtungsstation und 10 m hoher Mast auf Samoilow (2017 eingerichtet). (Foto: P. Verzone)



## Kohlenstoffumsatz von auftauendem Permafrost im Lenadelta

Die andauernde Klimaerwärmung hat einen starken Einfluss auf Permafrostböden. Das Auftauen der oberflächennahen Schicht geht immer tiefer. Eine andere Folge ist das Einsetzen von Thermokarst, welcher am stärksten im eisreichen Permafrost auftritt, wie z. B. in Eiskomplex-Ablagerungen (Abbildung 1), die sich während der letzten Vereisung gebildet haben.

Das Auftauen des Permafrostes verursacht die Freisetzung erhöhter Mengen an organischem Kohlenstoff, welcher durch Mikroorganismen abgebaut werden kann. Es ist immer noch umstritten, wie schnell der organische Kohlenstoff im Permafrost zersetzt wird, die Treibhausgase  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  gebildet werden und wie viel von diesen Gasen in die Atmosphäre freigesetzt werden.

Diesen wichtigen Forschungsfragen wurde während der Lenadelta-Expeditionen von 2013 bis 2017 im Rahmen der russisch-deutschen Permafrostprojekte CAR-BOPERM (BMBF-Förderung 2013-2016) und KoPf (BMBF-Förderung 2017-2021)

Abbildung 1: Pleistozäne Permafrostablagerungen auf der Insel Kurungnach im Lenadelta. Links: Thermoerosionsspuren an der Auftaufront der Eiskomplex-Ablagerungen (Foto aufgenommen im Juli 2016). Rechts: Exponierter Eiskomplex mit deutlich sichtbaren Eiskeilen (hellgrau), die das mineralische Permafrostmaterial (dunkelbraun) umgeben. Das rechte Foto wurde 2010 von I. Preuss aufgenommen.





nachgegangen. Zusammen mit ihren russischen Projektpartnern haben Wissenschaftler der Universitäten Hamburg und Köln und des GFZ in Potsdam die sehr gut ausgestatteten Labore der Forschungsstation Insel Samoillow (FS Samoillow) genutzt, um mittels Feld- und Laboranalysen  $\text{CH}_4$ - und  $\text{CO}_2$ -Flüsse sowie den Umsatz von organischem Kohlenstoff (Abbildung 2) zu erforschen.

Die Möglichkeit solcher Messungen auf der neuen FS Samoillow ist in der sibirischen Arktis einzigartig und die bislang gesammelten Boden-, Pflanzen-, Wasser-, und Gasproben tragen dazu bei, die offenen Forschungsfragen zu beantworten. Zahlreiche internationale wissenschaftliche Veröffentlichungen, die auf der Forschung im Lenadelta basieren, halfen dabei, den Kohlenstoffumsatz nach dem Auftauen sowie die Treibhausgasemissionen (z. B.  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  bis 2100) über lange Zeiträume hinweg besser zu verstehen.

Die organische Substanz in Permafrostböden ist für Mikroorganismen leicht verfügbar und daher anfällig für die schnelle Zersetzung. Ein Vergleich der Umsetzung von organischem Kohlenstoff unter oxischen Bedingungen, wie sie in gut entwässerten Hochlandböden vorkommen, und unter anoxischen Bedingungen, typisch für wassergesättigte Niederungsböden, zeigte, dass sich viel weniger organische Substanz im auftauenden Permafrost auf Kurungnach und Samoillow in Abwesenheit von Sauerstoff abgebaut wird. Unter anoxischen Bedingungen wird jedoch das stärkere Treibhausgas  $\text{CH}_4$  in gleichen Mengen gebildet wie  $\text{CO}_2$ .



Weil Methan klimawirksamer ist, werden mehr klimarelevantere Gase in anoxischen, wassergesättigten Böden gebildet. Auf der FS Samoilow sind analytische Techniken verfügbar, um  $\text{CO}_2$ -Proben zu nehmen, welches direkt vor Ort aus dem Permafrost freigesetzt wurde und dieses in anschließenden Radiokarbonuntersuchungen in den Laboren der Universität Köln zu untersuchen.

Diese Methode ermöglicht die Identifizierung und Quantifizierung des Anteils an altem Kohlenstoff, der seit Jahrtausenden in den Yedoma-Ablagerungen des Pleistozäns gelagert wurde und nun in den aktiven Kohlenstoffkreislauf eintritt. Die Ergebnisse zeigen, dass bis zu 70 % des eingefrorenen organischen Materials durch Auftauprozesse in die Atmosphäre freigesetzt werden könnte und dass durch die Mischung mit jüngeren organischen Material (freigesetzt im Zuge von Tau- und Erosionsprozessen), die Zersetzung angeregt und verstärkt werden kann.



Etliche wissenschaftliche Fragen sind noch unbeantwortet, wie zum Beispiel, ob das Tauen des Permafrostes die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme durch Pflanzen beeinflusst oder wie schnell frisch aufgetaute organische Substanz sich unter den in-situ-Bedingungen zersetzt. Diese Fragen werden Teil zukünftiger Forschung auf der FS Insel Samoilow in enger Zusammenarbeit mit den russischen Partnern während des russisch-deutschen Permafrostprojekts KoPf sein.

*Christian Knoblauch, Janet Rethemeyer, Alexander Schütt, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer*

Abbildung 2: Gelände- und Laborarbeiten im Lenadelta. Seite 182: Permafrost-Bohrung auf Kurungnackh. Seite 183 oberes Foto: Messung der Treibhausgas-Flüsse aus tauendem Permafrost auf Kurungnackh. Unteres Foto: Gasmessungen im GC-Labor der alten Samoilov-Station (Foto: C.Fiencke)



(Photo: P. Verzone)



# 6.

Kooperationen im Rahmen  
zukünftiger Lena-Expeditionen  
Ein Ausblick



## Künftige Zusammenarbeit der terrestrischen Polarforschung in der Lenadeltaregion – Ein Ausblick

Derzeitige Erdsystemmodelle, die entwickelt wurden, um zukünftige globale Veränderungen von Umwelt und Klima vorherzusagen, weisen immer noch größere Schwächen bei der Implementierung der Dynamiken von Kryosphärenprozessen auf. Besonders Prozesse, die typisch für die weitläufigen Permafrostlandschaften sind und die Auswirkungen vom mikrobiellen bis hin zum kontinentalen Maßstab haben, sind unzureichend repräsentiert. Sie umfassen Permafrostentstehung und -degradation, den Kohlenstoffkreislauf in Böden und Vegetationsdynamiken, die Hydrologie des Nordens und den Energieaustausch zwischen Oberfläche und Atmosphäre.

Permafrostgebiete gehören zu den anfälligsten Landschaften auf unserer Erde und sind bereits von schneller Erwärmung und Auftauen betroffen, was Bodenabsenkung und -erosion sowie Veränderungen der biogeochemischen Kreisläufe, der Vegetationszusammensetzung und der hydrologischen Systeme zur Folge hat. Das Tauen des Permafrosts wird sich auf die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auswirken. Darüber hinaus werden die Permafrostregionen der Arktis aufgrund einer sich verbessernden Erreichbarkeit zunehmende Aufmerksamkeit mittels wirtschaftlicher und sozialer Entwicklungsprojekte erfahren.

In den letzten Jahrzehnten war die Lenadeltaregion in Nordsibirien ein wichtiges Untersuchungsgebiet für die russische und internationale Erforschung der arktischen Kryosphäre und Ökosysteme. Dadurch, dass nun dank intensiver Feldforschung und Fernerkundung längere Zeitreihen vieler Parameter verfügbar sind, steht diese Region an der Schwelle, einer der wertvollsten Forschungsstandorte für das Verständnis von Langzeitentwicklungen der Umwelt in der Hocharktis in einem sich erwärmenden Klima zu werden. Darüber hinaus ist das Lenadelta ein besonders gefährdetes Fluss-Ökosystem am Übergangsbereich zwischen Land, Ozean und Atmosphäre, das von Küstenerosion, Meeresspiegelanstieg, Veränderungen des Abflussregimes und der Wassertemperaturen sowie Änderungen der Flora und Fauna geprägt wird.

Die wissenschaftlichen Bemühungen – auch angetrieben durch konkrete umweltpolitische Erfordernisse – nach einem besseren Verständnis der Umweltprozesse und -dynamiken in der sich rapide entwickelnden Arktis resultierten schon in eine Vielzahl international abgestimmter Aktivitäten in der Region und werden sich weiter verstärken. Das Lenadelta mit seinen Forschungsstationen, wie z. B. auf Samoilow, kann eine erstklassige Untersuchungsregion für wichtige wis-



senschaftliche Entdeckungen in der sibirischen Arktis bleiben. Die Region ist bedeutend, um die bestehenden Unsicherheiten, die derzeit mit der Vorhersage zukünftiger Umweltbedingungen der Arktis einhergehen, zu verringern.

Daher ist es wichtig, die existierenden internationalen Polarforschungsprogramme in dieser Region weiterzuführen und zu fördern. Dies wird auch der Entwicklung des sibirischen Nordens zugutekommen. Die Gestaltung und Verwirklichung der neuen polaren Forschungsstation Insel Samoilow (FS Samoilow) in 2013 war ein entscheidender Schritt in diese Richtung. Die neue Station unter russischer Leitung ist nunmehr seit einigen Jahren ein neues Zuhause für die Weiterführung der russisch-deutschen „Lena Expeditionen“ sowie für die internationale Polarforschung im Rahmen des INTERACT Framework for Arctic Research Stations. Die neue Station verfügt über eine ausgezeichnete Infrastruktur für topaktuelle Forschung in einer entlegenen hocharktischen Permafrostregion und wird internationalen Forschern weiterhin Zugang gewähren, wie es auf allen arktischen und antarktischen Stationen der Polargebiete üblich ist.

Abbildung 1: Die Lenadelta-Forschungsregion liegt im Herzen der arktischen Permafrostzone.

Aktuelle wissenschaftliche Kenntnislücken, denen sich die Forschung im Lenadelta widmen kann, umfassen Quantifizierungsprozesse in Verbindung mit Permafrostodynamiken (sowohl Auftauen als auch Entstehung) und deren Einfluss auf organischen Kohlenstoff im Boden. Abschätzungen der Konsequenzen des Permafrostauftauens für das globale Klima sind immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet, obwohl jüngste Studien doch gerade deren Wichtigkeit auf globaler Ebene in verschiedenen Klimaszenarien aufzeigen. Um diese Lücken zu schließen, ist es wichtig, biogeochemische Feld- und Laboruntersuchungen, atmosphärische und meteorologische Studien, Fernerkundungsanalysen von Änderungen der Landschaft und Küste durch Permafrostauftauern, geophysikalische Beobachtungen sowie die Modellierung von Permafrost und Kohlenstoff über verschiedenste zeitliche und räumliche Größenordnungen hinweg weiterzuführen. Russisch-deutsche Forschung im Lenadelta und auf der FS Samoilow haben auf international sichtbarem Niveau bereits wichtige Beiträge zu dieser Forschung geleistet.

Die russisch-deutschen Forschungsaktivitäten im Lenadelta und seiner Umgebung haben auf einzigartige Weise zur Rekonstruktion der Klima- und Umweltgeschichte permafrostbeeinflusster Landschaften im Nordsibirien der letzten 200.000 Jahre beigetragen. Eine vollständige Untersuchung von Böden und Sedimenten sowohl in gefrorenen als auch ungefrorenen Bereichen des Unterbodens, wie unter Seen und Flüssen sowie deren Rolle für die Bildung von Treibhausgasen steht noch aus.

Durch Fokussierung auf Nord-Süd-Transekte ausgehend von borealen Nadelwäldern bis hin zur arktischen Tundra können Ökosystemstudien Wissenslücken über die schnellen Veränderungen schließen, die diese nördlichen Ökosysteme vielfältig betreffen. Biogeochemische Studien von Stickstoff- und Phosphorkreisläufen in Permafrostgebieten werden unser Verständnis der biologischen Einschränkungen der Flora und Fauna in Böden der kalten Klimazonen verbessern und auch den Fragen nachgehen, wie sich dies in einer sich erwärmenden Arktis ändert und wie Sibirien zu globalen Kreisläufen beiträgt, die weit entfernte Gebiete außerhalb der Arktis beeinflussen könnten.

Die Integration von Ergebnissen verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen wird der Schlüssel der künftigen Forschungsaktivitäten in der Region sein. Sie wird eine noch engere Zusammenarbeit zwischen Partnern von verschiedenen Forschungseinrichtungen erfordern und deren Expertise in Permafrostforschung,



Hydrologie, Klimatologie, Botanik, Biologie, Mikrobiologie, Biogeochemie, Quartärgeologie, Paläontologie, Geophysik, Fernerkundung und numerischer Modellierung erfordern. Kontinuierliche, wegbereitende und topaktuelle Polarforschung im entlegenen Norden setzt auch voraus, dass technologische Entwicklungen und logistische Expertise ebenso mit vorangetrieben werden.

Umweltmessstationen auf Samoillow sind seit vielen Jahren Teil internationaler Netzwerke, inklusive dem Globalen Terrestrischen Netzwerk für Permafrost (GTN-P) oder dem globalen FluxNet-Netzwerk für mikrometeorologische Beobachtungen. Die bestehenden Observatorien auf Samoillow liefern verlässliche Daten zu Permafrosttemperaturen, saisonalen und jährlichen natürlichen Kohlenstoffdioxid- und Methanflüssen sowie zur Energiebilanz der heterogenen Tundralandschaften. Aus diesem Grund ist dieser Forschungsstandort im sonst sehr spärlich erfassten Norden Sibiriens - dem größten Permafrostgebiet der Erde - ein entscheidender Baustein in internationalen Beobachtungsnetzwerken. Die Daten, die an diesem Beobachtungsstandort erhoben werden, liefern wichtige Puzzleteile in globalen Bestrebungen, den künftigen Status des Klimas in Erdsystemmodellen vorherzusagen.

Die russisch-deutsche Permafrostforschung der vergangenen 20 Jahre im Rahmen der Lena-Expeditionen auf Samoillow, im Lenadelta und den angrenzenden Gebieten ist ein ausgezeichnetes und höchst sichtbares Beispiel internationaler Kooperation mit dem Ziel, ein besseres Verständnis unseres Klimas und unserer Umwelt zu erlangen. Die großzügige Unterstützung dieser Forschung über solch einen langen Zeitraum durch viele Einzelpersonen, Forschungseinrichtungen und Organisationen an höchster Stelle ermöglichte die Etablierung einer einzigartigen Forschungs- oase in der Arktis, die sich wissenschaftliche Arbeit, Entdeckung und Zusammenarbeit zum übergreifenden Ziel gesetzt hat. Dies sollte auch in Zukunft fortgesetzt werden.

*Guido Grosse, Dmitry Yu. Bolshiyarov, Mikhail N. Grigoriev, Eva-Maria Pfeiffer, Igor N. Yeltsov, Hans-Wolfgang Hubberten*

Neue, klimatisierte Beobachtungsstation und 10 m hoher Mast auf Samolow (2017 eingerichtet). (Foto: P. Schreiber)





Anhang

## Autoren und Zugehörigkeiten

**Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und  
Meeresforschung, Bremerhaven**

Astrid Bracher  
Gerhard Kattner  
Boris P. Koch  
Thomas Krumpfen  
Gesine Mollenhauer  
Maria Winterfeld

**Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und  
Meeresforschung, Helgoland**

Ingeborg Bussmann  
Alexandra Kraberg

**Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und  
Meeresforschung, Potsdam**

Andrei A. Andreev  
Sofia A. Antonova  
Boris Biskaborn  
Julia Boike  
Niko Bornemann  
Bernhard Diekmann  
Laura S. Epp  
Matthias Fuchs  
Guido Grosse  
Frank Günther  
Birgit Heim  
Ulrike Herzschuh  
Hans-Wolfgang Hubberten  
Juliane Klemm  
Stefan Kruse  
Moritz Langer  
Hugues Lantuit  
Hanno Meyer  
Anne Morgenstern  
Sina Muster  
Larisa B. Nazarova  
Bastian Niemeyer  
Ingmar Nitze  
Thomas Opel  
Pier Paul Overduin  
Volker Rachold  
Lutz Schirrmester  
Waldemar Schneider  
Peter Schreiber  
Georg Schwamborn  
Christine Siegert  
Samuel Stettner  
Günter Stooß  
Kathleen R. Stooß-Leichsenring  
Jens Strauss

Sebastian Wetterich  
Mareike Wiczoreck  
Heike H. Zimmermann

**Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und  
Meeresforschung, Sylt**

Lasse Sander  
Karen H. Wiltshire

**Nordöstliche Föderale Universität  
(NEFU), Jakutsk, Republik Sacha,  
Russland**

Ruslan M. Gorodnichenov  
Mikhail N. Grigoriev  
Anatolii N. Nikolaev  
Luidmila A. Pestryakova  
Evgenij S. Zakharov

**Arktisches und Antarktisches  
Forschungsinstitut (AARI), St.  
Petersburg, Russland**

Dmitry Yu. Bolshiyarov  
Antonina A. Chetverova  
Alexander S. Makarov

**Zentralsibirischer Botanischer  
Garten, Sibirischer Zweig,  
Russische Akademie der  
Wissenschaften (RAS),  
Nowosibirsk, Russland**

Nikolay N. Lashchinskiy

**Helmholtz-Zentrum Geesthacht,  
Zentrum für Material- und  
Küstenforschung**

Tina Sanders

**Helmholtz-Zentrum  
Potsdam, Deutsches  
GeoForschungsZentrum**

Katrin Kohnert  
Eric Larmanou  
Susanne Liebner  
Torsten Sachs  
Andrei Serafimovich  
Christian Wille  
Dirk Wagner

**Staatliche Pädagogische Herzen  
Universität St. Petersburg,  
Russland**

Grigory A. Soloviev  
Dmitry A. Subetto

**Humboldt-Universität zu Berlin,  
Geographisches Institut**

Julia Boike  
Moritz Langer

**Karelisches Forschungszentrum,  
Russische Akademie der  
Wissenschaften (RAS), Institut  
für Wasserprobleme des Nordens,  
Petrosawodsk, Russland**

Dmitry A. Subetto

**Kasaner Föderale Universität,  
Kasan, Russland**

Larisa A. Frolova  
Irina I. Vishnyakova

**Komarow-Institut für Botanik,  
Russische Akademie der  
Wissenschaften (RAS), St.  
Petersburg, Russland**

Mikhail P. Zhurbenko

**Lenadelta-Reservat, Tiksi  
Russland**

Ekaterina N. Abramova  
Irina A. Yakshina

**Staatliche Universität Moskau,  
Fakultät für Geologie, Russland**

Alexander Yu. Dereviagin  
Tatyana V. Kuznetsova  
Vladimir E. Tumskoy

**Melnikov Permafrost Institut,  
Sibirischer Zweig, Russische  
Akademie der Wissenschaften  
(RAS), Jakutsk, Russland**

Mikhail N. Grigoriev  
Viktor V. Kunitsky  
Georgii T. Maximov

**Murmansker Institut für  
Meeresbiologie, Kola  
Wissenschaftszentrum, Russische  
Akademie der Wissenschaften  
(RAS), Murmansk, Russland**

Denis V. Moiseev

**Senckenberg Forschungsstation  
für Quartärpaläontologie, Weimar**

Frank Kienast

**Staatliche Universität St. Petersburg, Russland**

Anna A. Abramova  
Antonina A. Chetverova  
Irina V. Fedorova  
Irina I. Vishnyakova

**Bonch-Bruевич-Universität für Telekommunikation, St. Petersburg, Russland**

Felix E. Are

**Sibirische Föderale Universität, Krasnojarsk, Russland**

Svetlana Yu. Evgrafova

**Sukachev-Institut für Waldforschung, Krasnojarsk, Russland**

Svetlana Yu. Evgrafova

**Technische Universität Bergakademie Freiberg**

Martin Antonow

**Trofimuk-Institute für Erdöl-Gas-Geologie und Geophysik, Sibirischer Zweig, Russische Akademie der Wissenschaften (RAS), Nowosibirsk, Russland**

Alexey N. Faguet  
Mikhail N. Grigoriev  
Vladimir A. Kashirtsev  
Vladimir V. Olenchenko  
Leonid V. Tsibizov  
Igor N. Yeltsov

**Staatliche Universität für Öl und Gas, Tjumen, Russland**

Anna N. Kurchatova

**Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde**

Fabian Beermann  
Claudia Fiencke  
David Holl  
Christian Knoblauch  
Lars Kutzbach  
Eva-Maria Pfeiffer  
Alexander Schütt  
Sebastian Zubrzycki

**Universität Hamburg, Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit**

Christian Knoblauch  
Lars Kutzbach  
Eva-Maria Pfeiffer

**Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut**

Sofia A. Antonova

**Universität Potsdam, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften**

Bernhard Diekmann  
Guido Grosse  
Ulrike Herzschuh  
Hugues Lantuit  
Larisa B. Nazarova

**Universität Potsdam, Institut für Biochemie und Biologie**

Ulrike Herzschuh  
Florian Jeltsch  
Susanne Liebner  
Ralph Tiedemann

**Universität zu Köln, Institut für Geologie und Mineralogie**

Andrei A. Andreev  
Martin Melles  
Janet Rethemeyer

**Universität Leipzig, Institut für Geographie**

Mathias Ulrich

**University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute, Fairbanks, Alaska, USA**

Alexander L. Kholodov

**V.S. Sobolev-Institut für Geologie und Mineralogie, Sibirischer Zweig, Russische Akademie der Wissenschaften (RAS), Nowosibirsk, Russland**

Andrey A. Kartoza

**Winogradsky-Institut für Mikrobiologie, Forschungszentrum für Biotechnologie der Russischen Akademie der Wissenschaften (RAS), Moskau, Russland**

Elena E. Lebedeva

**Jakutische Behörde für Hydrometeorologie, Tiksi, Russland**

Alexander Yu. Gukov

## Literaturnachweise der einzelnen Kapitel

### 1

#### **Seesedimente auf Taimyr und Sewernaja Semlja als Klima-Archiv**

Andreev, A., Tarasov, P. E., Klimanov, V. A., Melles, M., Lisitsina, O. M. and Hubberten, H.-W. (2004) Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Taymyr Peninsula during the Late Pleistocene and Holocene reconstructed from pollen records, *Quaternary International* 122, 69-84.

Ebel, T., Melles, M., Niessen, F. (1999) Laminated sediments from Levinson-Lessing Lake, northern Central Siberia - a 30.000 year record of environmental history?, in: Kassens, H., Bauch, H. A., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokohov, L. A. (eds), *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, Lecture notes in earth science, Springer, Berlin, 425-435.

Raab, A., Melles, M., Berger, G. W., Hagedorn, B., Hubberten, H.-W. (2003) Non-glacial paleoenvironments and the extent of Weichselian ice sheets on Severnaya Zemlya, Russian High Arctic, *Quaternary Science Reviews* 22, 2267-2283.

Svendsen, J. I., Alexanderson, H., Astakhov, V. I., Demidov, I., Dowdeswell, J. A., Funder, S., Gataullin, V., Henriksen, M., Hjort, C., Houmark-Nielsen, M., Hubberten, H.-W., Ingolfsson, O., Jakobsson, M., Kjaer, K., Larsen, E., Lokrantz, H., Lunkka, J. P., Lysa, A., Mangerud, J., Matioushkov, A., Murray, A., Möller, P., Niessen, F., Nikolskaya, O., Polyak, L., Saarnisto, M., Siegert, C., Siegert, M. J., Spielhagen, R., Stein, R. (2004) Late Quaternary ice sheet history on northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews* 23, 1229-1271.

#### **Erste Studien zu Energie-, Wasser- und Spurengasflüssen in Tundraböden: Labas-See und Lewinson-Lessing-See, Taimyr-Halbinsel**

Boike, J., Roth, K., Overduin, P. P. (1998) Thermal and Hydrologic Dynamics of the Active Layer at a Continuous Permafrost Site (Taymyr Peninsula, Siberia), *Water Resources Research* 34, 355-363.

Gundelwein, A., Müller-Lupp, T., Sommerkorn, M., Haupt, E. T., Pfeiffer, E.-M., Wiechmann, H. (2007) Carbon in tundra soils in the Lake Labaz region of arctic Siberia, *European Journal of Soil Science* 58, 1164-1174.

Melles, M., Hagedorn, B., Bolshiyarov, D. (eds) (1997) *Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1996*, Reports on Polar Research 237.

Pfeiffer, E.-M., Hartmann, J. (1995) Characterization of organic matter in permafrost-affected soils, in: Siegert, C., Bolshiyarov, D. (eds), *Reports on Polar Research* 175, 36-39, 83 - 89.

Pfeiffer, E.-M., Gundelwein, A., Nöthen, T., Becker, H., Guggenberger, G. (1996) Characterization of organic matter in permafrost soils and sediments of the Taymyr Peninsula / Siberia and Severnaya Zemlya, in: Bolshiyarov, D. Y., Hubberten, H.-W. (eds), *Reports on Polar Research* 211, 46-63.

#### **Untersuchungen von Permafrost-Sequenzen in der Taimyr-Tiefebene (1994-1996)**

Andreev, A. A., Siegert, C., Klimanov, V. A., Derevyagin, A. Y., Shilova, G. N., Melles, M. (2002) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate changes in the Taymyr lowland, Northern Siberia reconstructed from pollen records, *Quaternary Research* 57, 138-150.

Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Siegert, C., Ebel, T., Klimanov, V. A., Melles, M., Bobrov, A. A., Derevyagin, A. Y., Lubinski, D. J., Hubberten, H.-W. (2003) Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, *Arctic Russia, Boreas* 32, 484-505.

Kienast, F. W., Siegert, C., Derevyagin, A., Mai, D.-H. (2001) Climate implications of Late Quaternary plant macrofossil assemblages from the Taymyr Peninsula, Siberia, *Global and Planetary Change* 31, 265-281.

Kienel, U., Siegert, C., Hahne, J. (1999) Late Quaternary paleoenvironmental reconstructions from a permafrost sequence (North Siberian Lowland, SE Taymyr Peninsula): a multidisciplinary case study, *Boreas* 28, 181-193.

#### **Kohlenstoff in den arktischen Wüstenböden von Sewernaja Semlja**

Bolshiyarov, D., Hubberten, H.-W. (1996) *Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1995 and the Expedition Kolyma 1995 of the ISSP Pushchino Group*, Reports on Polar Research 211.

Pfeiffer E.-M., Gundelwein, A., Nöthen, T., Becker, H., Guggenberger, G. (1996) Characterization of organic matter in permafrost soils and sediments of the Taymyr Peninsula/Siberia and Severnaya Zemlya/Arctic region, in: Bolshiyarov, D., Hubberten, H.-W. (eds), *Russian-German Cooperation: The Expedition Taymyr 1995*, Reports on Polar Research 211, 46-63, 186-195.

Zhurbenko, M. P. (1995) *Geobotanical Studies*, in: Siegert, C., Bolshiyarov, D. (eds), *The Expedition Taymyr 1994*, Reports on Polar Research 175, 25-26.

#### **Hydrologie, Geochemie und Sedimenttransport in den Flüssen Sibiriens - Das SYSTEM LAPTEV SEA Projekt 1994-1997**

Lara, R. J., Rachold, V., Kattner, G., Hubberten, H.-W., Guggenberger, G., Skoog, A., Thomas, D. N. (1998) Dissolved organic matter and nutrients in the Lena River, Siberian Arctic: characteristics and distribution, *Marine Chemistry* 59, 301-309.

Levasseur, S., Rachold, V., Birk, V., Allegre, C. J. (2000) Osmium behaviour in estuaries: the Lena River example, *Earth and Planetary Science Letters* 177, 227-235.

Rachold, V. (1999) Major, trace, and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean, in: Kassens, H., Bauch, H., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L. A. (eds), *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, Springer, Berlin, 199-222.

Rachold, V., Eisenhauer, A., Hubberten, H.-W., Hansen, B., Meyer, H. (1997) Sr isotopic composition of suspended particulate material (SPM) of East Siberian Rivers: Sediment transport to the Arctic Ocean, *Arctic Antarctic and Alpine Research* 29, 422-429.

Rachold, V., Hubberten, H.-W. (1999) Carbon isotope composition of particulate organic material in East Siberian rivers, *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, in: Kassens, H., Bauch, H., Dmitrenko, I., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L.A. (eds), *Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history*, Springer, Berlin, 223-238.

## 2

### **Initiierung des Forschungsprojekts Lenadelta:**

#### **Wissenschaftliche Strategie, Kooperation und Logistik**

Rachold, V. (1999) Expeditions in Siberia in 1998, *Reports on Polar and Marine Research* 315.

Rachold, V. (2000) Expeditions in Siberia in 1999, *Reports on Polar and Marine Research* 354.

Rachold, V. (2002) The modern and ancient terrestrial and coastal environment of the Laptev Sea region, *Siberian Arctic, Polarforschung* 70.

Rachold, V., Grigoriev, M. N. (2001) Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Expedition Lena 2000, *Reports on Polar and Marine Research* 388.

#### **Die ersten Jahre der boden- und klimabezogenen Permafrostforschung auf Samoilow und Umgebung (Untersuchungen 1998-2001)**

Alawi, M., Lipski, A., Sanders, T., Pfeiffer, E.-M., Spieck, E. (2007) Cultivation of a novel cold-adapted nitrite oxidizing beta proteo bacterium from Siberian Arctic, *The ISME Journal* 1, 256-264.

Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoof, G., Westermann, S., Wischnewski, K., Wille, C., Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, *Siberia (1998-2011)*, *Biogeosciences* 10, 2105-2128.

Kutzbach, L., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2004) Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra, *Lena Delta, Northern Siberia*, *Biogeochemistry* 69, 341-362.

#### **Bykowski-Halbinsel: Die erste Landexpedition mit Fokus auf das Paläoklima**

Kienast, F., Schirrmeyer, L., Siegert, C., Tarasov, P. (2005) Palaeobotanical evidence for warm summers in the East Siberian Arctic during the last cold stage, *Quaternary Research* 63, 283-300.

Meyer, H., Dereviagin, A., Siegert, C., Schirrmeyer, L., Hubberten, H.-W. (2002) Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia - Hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges, *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 91-105.

Schirrmeyer, L., Siegert, C., Kuznetsova, T., Kuzmina, S., Andreev, A. A., Kienast, F., Meyer, H., Bobrov, A. A. (2002) Paleoenvironmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia, *Quaternary International* 89, 97-118.

Wetterich, S., Schirrmeyer, L., Pietrzenuk, E. (2005) Freshwater ostracodes in Quaternary permafrost deposits from the Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology* 34, 363-376.

#### **Schiffsexpeditionen von 1998 bis 2002 zur Untersuchung von Erosion und Geomorphologie der Küste mit Dunai, Neptun, Sofron Danilov und Pavel Bashmakov**

Are, F. E., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2005) Using thermoterrace dimensions to calculate the coastal erosion rate, *Geo-Marine Letters* 25, 121-126.

Are, F., Reimnitz, E., Grigoriev, M., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2008) The Influence of Cryogenic Processes on the Erosional Arctic Shoreface, *Journal of Coastal Research* 24, 110-121.

Rachold, V., Eicken, H., Gordeev, V. V., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Lisitzin, A. P., Shevchenko, V. P., Schirrmeyer, L. (2003) Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean, in: Stein, R., Macdonald, R. W. (eds), *Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean: Present and Past*, Springer, Berlin, 33-55.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Are, F. E., Solomon, S., Reimnitz, E., Kassens, H., Antonow, M. (2000) Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas, *International Journal of Earth Sciences* 89, 450-460.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Bauch, H. A. (2002) An estimation of the sediment budget in the Laptev Sea during the last 5,000 years, *Polarforschung* 70, 151-157.

#### **Untersuchung von Seen auf Arga: Geschichte und Entstehung des Lenadeltas**

Andreev, A., Tarasov, P. E., Schwamborn, G., Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Bobrov, A. A., Klimanov, V. A., Rachold, V., Hubberten, H.-W. (2004) Holocene paleoenvironmental records from Nikolay Lake, Lena River Delta, *Arctic Russia*, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 209, 197-217.

Biskaborn, B. K., Herzsich, U., Bolshiyarov, D. Y., Savelieva, L., Diekmann, B. (2013) Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena Delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology* 49, 155-170.

Schirrmeyer, L., Grosse, G., Schnelle, M., Fuchs, M., Krbetschek, M., Ulrich, M., Kunitzky, V., Grigoriev, M., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Klimova, I., Babiy, O., Bobrov, A., Wetterich, S., Schwamborn, G. (2011) Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 299, 175-196.

Schwamborn, G., Andreev, A., Rachold, V., Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N., Tumskov, V., Pavlova, E. Y., Dorozhkina, M. V. (2002) Evolution of Lake Nikolay, Arga Island, Western Lena River delta, during Late Pleistocene and Holocene time, *Polarforschung* 70, 69-82.

Schwamborn, G., Rachold, V., and Grigoriev, M. N. (2002) Late Quaternary Sedimentation History of the Lena Delta, *Quaternary International* 89, 119-134.

#### **Mikrobieller Kohlenstoffumsatz in der Auftauschicht und im Permafrost**

Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., Pfeiffer, E.-M. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost, *Nature Climate Change* 8, 309-312.

Liebner, S., Zeyer, J., Wagner, D., Schubert, C., Pfeiffer, E.-M., Knoblauch, C. (2011) Methane oxidation associated with submerged brown mosses reduces methane emissions from Siberian polygonal tundra, *Journal of Ecology* 99, 914-922.

Wagner, D., Schirmack, J., Ganzert, L., Morozova, D., Mangelsdorf, K. (2013) *Methanosarcina soligelidi* sp. nov., a desiccation- and freeze-thaw-resistant methanogenic archaeon from a Siberian permafrost-affected soil, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 63, 2986-2991.

#### **Feldarbeit für die Rekonstruktion der Paläoumwelt**

Andreev, A., Grosse, G., Schirrmeyer, L., Kuznetsova, T. V., Kuzmina, S. A., Bobrov, A. A., Tarasov, P. E., Novenko, E. Y., Meyer, H., Derevyagin, A. Y., Kienast, F., Bryantseva, A., Kunitzky, V. V. (2009) Weichselian and Holocene palaeoenvironmental history of the Bol'shoy Lyakhovsky Island, New Siberian Archipelago, Arctic Siberia, *Boreas* 38, 72-110.

Palagushkina, O. V., Wetterich, S., Schirrmeyer, L., Nazarova, L. B. (2017) Modern and fossil diatom assemblages from Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago, Arctic Siberia), *Contemporary Problems of Ecology* 10, 380-394.

Sher, A. V., Kuzmina, S. A., Kuznetsova, T. V., Sulerzhinsky, L. D. (2005) New insights into the Weichselian environment and climate of the East Siberian Arctic, derived from fossil insects, plants, and mammals, *Quaternary Science Reviews* 24, 533-569.

Wetterich, S., Rudaya, N., Andreev, A. A., Opel, T., Schirrmeyer, L., Meyer, H., Tumskov, V. (2014) Ice Complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 Interstadial, *Quaternary Science Reviews* 84, 39-55.

## **3**

### **Submarine Permafrostbohrungen während der COAST 2005 Expedition**

Rachold, V., Bolshiyarov, D. Y., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Junker, R., Kunitzky, V. V., Merker, F., Overduin, P. P., Schneider, W. (2007) Near-shore Arctic Subsea Permafrost in Transition, EOS: Transactions of the American Geophysical Union 88, 149-156.

Overduin, P. P., Grigoriev, M. N., Junker, R., Rachold, V., Kunitzky, V. V., Bolshiyarov, D. Y., Schirrmeyer, L. (2007) Russian-German Cooperation System Laptev Sea: The Expedition Coast I. Coast Drilling Campaign 2005: Subsea permafrost studies in the near-shore zone of the Laptev Sea, in: Schirrmeyer, L. (ed), *Expeditions in Siberia in 2005, Reports on Polar and Marine Research* 550.

### **Die frühe Forschungsstation Insel Samoilow und ihre Erweiterung 2005**

Hubberten, H.-W., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M., Boike, J., Gukov, A. Y. (2006) *The Russian-German*

*Research Station Samoylov, Lena Delta - A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic*, *Polarforschung* 73, 111 - 116.

Pfeiffer, E.-M., Grigoriev, M. N. (2002) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The expedition Lena-Anabar 2003, *Reports on Polar Marine Research* 426, 1-186.

Rachold, V., Grigoriev, M. N. (1999) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The expedition Lena 1998, *Reports on Polar Marine Research* 315, 1-268.

Schirrmeyer, L., Grigoriev, M. N., Kutzbach, L., Wagner, D., Bolshiyarov, D. Y. (2004) Russian-German cooperation System Laptev Sea: The expedition Lena-Anabar 2003, *Reports on Polar and Marine Research* 489, 1-231.

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

### **Installation des Samoilow Observatoriums - wissenschaftliches Monitoring von Klimadaten, Permafrostböden und Treibhausgasen (Untersuchungen 2002-2006)**

Pfeiffer, E.-M., Wagner, D., Kobabe, S., Kutzbach, L., Kurchatova, A., Stoof, G., Wille, C. (2002) Modern Processes in Permafrost Affected Soils, in: Pfeiffer, E.-M., Grigoriev, M. (eds), *Russian-German Cooperation System Laptev Sea 2000: The Lena Delta 2001 Expedition*, *Reports on Polar and Marine Research* 426, 21-41.



Kutzbach, L., Stoof, G., Schneider, W., Wille, C., Abramova, E. N. (2004) Seasonal progression of active-layer thickness dependent on microrelief, in: Schirrmeyer, L. et al. (eds), Russian-German Cooperation System Laptev Sea: The Expedition Lena-Anabar 2003, Reports on Polar and Marine Research 489, 34-38.

Kutzbach, L., Wille, C., Pfeiffer, E.-M. (2007) The exchange of carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River Delta, Northern Siberia, *Biogeosciences* 4, 869-890.

Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2008) Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling, *Global Change Biology* 14, 1395-1408.

**Mikrobieller Stickstoffumsatz in der Auftauschicht und den tieferen Permafrostsedimenten des Lenadeltas**  
Beermann, F., Langer, M., Wetterich, S., Strauss, J., Boike, J., Fiencke, C., Schirrmeyer, L., Pfeiffer, E.-M., Kutzbach, L. (2017) Permafrost thaw and liberation of inorganic nitrogen in eastern Siberia, *Permafrost and Periglacial Process* 28, 605-618.

Fiencke, C., Kopelke, S., Pfeiffer, E.-M. (2007) Microbial studies on nitrification from permafrost environments, in: Schirrmeyer, L., Wagner, D., Grigoriev, M. N., Bolshiyarov, D. Y. (eds), Russian-German Cooperation System Laptev Sea, The Expedition Lena 2005, Reports on Polar and Marine Research 550, 61-65.

Sanders, T., Fiencke, C., Pfeiffer, E.-M. (2010) Small-Scale Variability of Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), C/N Ratios and Ammonia Oxidizing Capacities in Various Permafrost Affected Soils of Samoylov Island, Lena River Delta, Northeast Siberia, *Polarforschung* 80, 23-35.

**Geokryologische und paläoökologische Studien an den Küsten der Laptewsee**

Kienast, F., Wetterich, S., Kuzmina, S., Schirrmeyer, L., Andreev, A., Tarasov, P., Nazarova, L., Kossler, A., Frolova, A., Kunitsky, V. V. (2011) Paleontological records indicate the occurrence of open woodlands in a dry inland climate at the present-day Arctic coast in western Beringia during the last interglacial, *Quaternary Science Reviews* 30, 2134-2159.

Schirrmeyer, L., Grosse, G., Kunitsky, V. V., Fuchs, M. C., Krbetschek, M., Andreev, A. A., Herzschuh, U., Babyi, O., Siegert, C., Meyer, H., Derevyagin, A.Y., Wetterich, S. (2010) The mystery of Bunge Land (New Siberian Archipelago): Implications for its formation based on palaeo-environmental records, geomorphology, and remote sensing, *Quaternary Science Reviews* 29, 3598-3614.

Schirrmeyer, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P. P., Strauss, J., Schuur, E. A. G., Hubberten, H.-W. (2011) Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the Northeast Siberian Arctic, *Journal of Geophysical Research* 116, G00M02.

Schirrmeyer, L., Kunitsky, V. V., Grosse, G., Wetterich, S., Meyer, H., Schwamborn, G., Babyi, O., Derevyagin, A. Y., Siegert, C. (2011) Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on North-East Siberian Arctic coastal lowlands and islands - a review, *Quaternary International* 241, 3-25.

**Langzeitbeobachtungen der pelagischen Fauna in Seen und Tümpeln des Lenadeltas**

Abramova, E. N., Zhulai, I. A. (2016) Appearance of new Zooplankton Species in the Waters of the Lena River Delta, Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences 320, 473-487.

Abramova, E. N., Vishnyakova, I., Boike, J., Abramova, A., Solov'yev, G., Martynov, F. (2017) Structure of freshwater zooplankton communities from tundra waterbodies in the Lena River Delta, Russian Arctic, with a discussion on new records of glacial relict copepods, *Polar Biology* 40, 1629-1643.

## 4

### Die Dynamik der arktischen Küsten

Are, F.E., Reimnitz, E., Grigoriev, M. N., Hubberten, H.-W., Rachold, V. (2008) The Influence of Cryogenic Processes on the Erosional Arctic Shoreface, *Journal of Coastal Research* 24, 110-121.

Grigoriev, M. N. (2008) Kriomorphogenez i litodinamika pribrezhno-shelf'ovoi zony morei Vostochnoi Sibiri (Cryomorphogenesis and lithodynamics of the East Siberian near-shore shelf zone), Habilitation thesis, Mel'nikov Permafrost Institute, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk.

Günther, F., Overduin, P. P., Sandakov, A. V., Grosse, G., Grigoriev, M. N. (2013) Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region, *Biogeosciences* 10, 4297-4318.

Lantuit, H., Overduin, P. P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D., Brown, J., Cherkashov, G., Drozdov, D., Forbes, D. L., Graves-Gaylord, A., Grigoriev, M., Hubberten, H.-W., Jordan, J., Jorgenson, T., Ødegård, R., Ogorodov, S., Pollard, W. H., Rachold, V., Sedenko, S., Solomon, S., Steenhuisen, F., Streletskaia, I., Vasiliev, A. (2011) The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines, Estuaries and Coasts 35, 383-400.

Rachold, V., Grigoriev, M. N., Bauch, H. (2000) An Estimation of the Sediment Budget in the Laptev Sea during the Last 5000 Years, *Polarforschung* 70, 151-157.

**Feldarbeit und Erstellung numerischer Modelle von submarinem Permafrost und Gashydraten**

Bussmann, I., Hackbusch, S., Schaal, P., Wichels, A. (2017) Methane distribution and oxidation around the Lena Delta in summer 2013, *Biogeosciences* 14, 4985-5002.

- Overduin, P. P., Haberland, C., Ryberg, T., Kneier, F., Jacobi, T., Grigoriev, M. N., Ohrnberger, M. (2015) Submarine permafrost depth from ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters* 42, 7581-7588.
- Overduin, P., Liebner, S., Knoblauch, C., Günther, F., Wetterich, S., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N. (2015) Methane oxidation following submarine permafrost degradation: Measurements from a central Laptev Sea shelf borehole, *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences* 120, 965-978.
- Romanovskii, N. N., Hubberten, H.-W., Gavrilov, A. V., Eliseeva, A. A., Tipenko, G. S. (2005) Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas, *Geo-marine letters* 25, 167-182.
- Winterfeld, M., Schirrmeister, L., Grigoriev, M. N., Kunitsky, V. V., Andreev, A., Murray, A., Overduin, P. P. (2011) Coastal permafrost landscape development since the Late Pleistocene in the western Laptev Sea, *Siberia, Boreas* 40, 697-713.
- Permafrostdegradation, Thermokarst und Thermoerosion - Feldforschung auf der Insel Kurungnach**
- Antonova, S., Sudhaus, H., Strozzi, T., Zwieback, S., Kääh, A., Heim, B., Langer, M., Bornemann, N., Boike, J. (2018) Thaw subsidence of a yedoma landscape in northern Siberia, measured in situ and estimated from TerraSAR-X interferometry, *Remote Sensing* 10, 494.
- Morgenstern, A., Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I., Schirrmeister, L. (2011) Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta, *The Cryosphere* 5, 849-867.
- Morgenstern, A., Ulrich, M., Günther, F., Roessler, S., Fedorova, I. V., Rudaya, N. A., Wetterich, S., Boike, J., Schirrmeister, L. (2013) Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study, *Geomorphology* 201, 363-379.
- Stettner, S., Beamish, A., Bartsch, A., Heim, B., Grosse, G., Roth, A., Lantuit, H. (2017) Monitoring Inter- and Intra-Seasonal Dynamics of Rapidly Degrading Ice-Rich Permafrost Riverbanks in the Lena Delta with TerraSAR-X Time Series, *Remote Sensing* 10, 51.
- Ulrich, M., Morgenstern, A., Günther, F., Reiss, D., Bauch, K. E., Hauber, E., Rössler, S., Schirrmeister L. (2010) Thermokarst in Siberian ice-rich permafrost: Comparison to asymmetric scalloped depressions on Mars, *Journal of Geophysical Research* 115, E10009.
- Mit Kettensäge zum Klimamodell - Eiskeile als Winterklima-Archive**
- Meyer, H., Opel, T., Laepple, T., Hoffmann, K., Dereviagin, A. Y., Werner, M. (2015) Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene, *Nature Geoscience* 8, 122-125.
- Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Siegert, C., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W. (2002) Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia - Hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges, *Permafrost and Periglacial Processes* 13, 91-105.
- Opel, T., Wetterich, S., Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Fuchs, M. C., Schirrmeister, L. (2017) Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait), *Climate of the Past* 13, 587-611.
- Opel, T., Laepple, T., Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Wetterich, S. (2017) Northeast Siberian ice wedges confirm Arctic winter warming over the past two millennia, *The Holocene* 27, 1789-1796.
- Dereviagin, A. Y., Chizhov, A. B., Meyer, H. (2010) Winter temperature conditions of the Laptev sea region during the last 50 Thousand Years in the isotopic records of ice wedges, *Kriosfera Zemli (Earth Cryosphere)* 14, 32-40.
- Veränderungen nordsibirischer Seen und Baumgrenzen in der Vergangenheit und Gegenwart als Reaktion auf Erwärmung**
- Bonan, G. B. (2008) Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320, 1444-1449.
- Herzschuh, U., Birks, H. J. B., Laepple, T., Andreev, A., Melles, M., Brigham-Grette, J. (2016) Glacial legacies on interglacial vegetation at the Pliocene-Pleistocene transition in NE Asia, *Nature Communications* 7.
- Kruse, S., Wiczorek, M., Jeltsch, F., Herzschuh, U. (2016) Treeline dynamics in Siberia under changing climates as inferred from an individual-based model for Larix, *Ecological Modelling* 338, 101-121.
- Kohlenstoff in Permafrost - Quantifizierung der Menge an organischem Material in Sibirien**
- Fuchs, M., Grosse, G., Strauss, J., Günther, F., Grigoriev, M., Maximov, G. M., Hugelius, G. (2018) Carbon and nitrogen pools in thermokarst-affected permafrost landscapes in Arctic Siberia, *Biogeosciences* 15, 953-971.
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J. W., Schuur, E. A. G., Ping, C.-L., Schirrmeister, L., Grosse, G., Michaelson, G. J., Koven, C. D., O'Donnell, J. A., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Y., Z., Palmtag, J., and Kuhry, P. (2014) Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps, *Biogeosciences* 11, 6573-6593.
- Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences* 10, 3507-3524.
- Schirrmeister, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P. P., Strauss, J., Schuur, E. A. G., Hubberten, H.-W. (2011) Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic, *Journal of Geophysical Research* 116, G00M02.

Strauss, J., Schirmeister, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schneider von Deimling, T., Schuur, E. A. G., Shmelev, D., Ulrich, M., Veremeeva, A. (2017) Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability, *Earth-Science Reviews* 172, 75-86.

#### **Expeditionen mit Gummibooten und kleinen Flussbooten – Hydrologie und Geomorphologie des Lenadeltas**

Bolshiyarov, D. Y., Makarov, A., Schneider, W., Stoof, G. (2013) Origination and evolution of the Lena River Delta, SPb. AARI. 295 pp. (In Russian).

Bolshiyarov, D., Makarov, A., Savelieva, L. (2015) Lena River Delta formation during the Holocene, *Biogeoscience* 12, 579-593.

Fedorova, I., Chetverova, A., Bolshiyarov, D., Makarov, A., Boike, J., Heim, B., Morgenstern, A., Overduin, P. P., Wegner, C., Kashina, V., Eulenburg, A., Dobrotina, E., Sidorina, I. (2015) Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations, *Biogeoscience* 12, 345-363.

Bolshiyarov, D., Makarov, A. (2001) Geomorphologic route along the URASALAKH River, *Reports on Polar and Marine Research* 489, 67-74.

#### **Mobilisierung und Ablagerung von Kohlenstoff im Lena-Flusssystem**

Dubinenkov, I., Flerus, R., Schmitt-Kopplin, P., Kattner, G., Koch, B. P. (2015) Origin-specific molecular signatures of dissolved organic matter in the Lena Delta, *Biogeochemistry* 123, 1-14.

Winterfeld, M., Laepple, T., Mollenhauer, G. (2015) Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia – Part 1: Radiocarbon inventories, *Biogeosciences* 12, 3769-3788.

Winterfeld, M., Goñi, M. A., Just, J., Hefter, J., Mollenhauer, G. (2015) Characterization of particulate organic matter in the Lena River delta and adjacent nearshore zone, NE Siberia – Part 2: Lignin-derived phenol compositions, *Biogeosciences* 12, 2261-2283.

#### **Holozäne Seen rund um das Lenadelta**

Biskaborn, B. K., Herzschuh, U., Bolshiyarov, D., Savelieva, L., Zibulski, R., Diekmann, B. (2013) Late Holocene thermokarst variability inferred from diatoms in a lake sediment record from the Lena Delta, Siberian Arctic, *Journal of Paleolimnology* 49, 155-170.

Biskaborn, B. K., Subetto, D., Savelieva, L. A., Vakhrameeva, P. S., Hansche, A., Herzschuh, U., Klemm, J., Heinecke, L., Pestryakova, L., Meyer, H., Kuhn, G., Diekmann, B. (2016) Late Quaternary vegetation and lake system dynamics in north eastern Siberia: Implications for seasonal climate variability, *Quaternary Science Reviews* 147, 406-421.

Diekmann, B., Pestryakova, L., Nazarova, L., Subetto, D., Tarasov, P. E., Stauch, G., Thiemann, A., Lehmkuhl, F., Biskaborn, B. K., Kuhn, G., Henning, D., Müller, S. (2017) Late Quaternary Lake Dynamics in the Verkhoyansk Mountains of Eastern Siberia: Implications for Climate and Glaciation History, *Polarforschung* 86, 97-110.

Schleusner, P., Biskaborn, B. K., Kienast, F., Wolter, J., Subetto, D., Diekmann, B. (2015) Basin evolution and palaeoenvironmental variability of the thermokarst lake El'gene-Kyuele, Arctic Siberia, *Boreas* 44, 216-229.

Schwaborn, G., Dix, J. K., Bull, J. M., Rachold, V. (2002) High-resolution seismic and ground-penetrating radar - geophysical profiling of a thermokarst lake in the western Lena Delta, Northern Siberia, *Permafrost and Periglacial Processes* 134, 259-269.

#### **Logistisch komplexe Einsätze – Beobachtungen von Energie- und Treibhausgasflüssen aus der Luft mittels Helipod**

Kohnert, K., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Sachs, T. (2017) Strong geologic methane emissions from discontinuous terrestrial permafrost in the Mackenzie Delta, Canada, *Scientific Reports* 7, 5828.

Kohnert, K., Juhs, B., Muster, S., Antonova, S., Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Sachs, T. (2018) Toward understanding the contribution of waterbodies to the methane emissions of a permafrost landscape on a regional scale—A case study from the Mackenzie Delta, Canada, *Global Change Biology* 24, 3976-3989.

Lampert, A., Hartmann, J., Pätzold, A., Lobitz, L., Hecker, P., Kohnert, K., Larmanou, E., Serafimovich, A., Sachs, T. (2018) Comparison of the fast Lyman-Alpha and LICOR hygrometers for measuring airborne turbulent fluctuations, *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 2523-2536.

Serafimovich, A., Metzger, S., Hartmann, J., Kohnert, K., Zona, D., Sachs, T. (2018) Upscaling surface energy fluxes over the North Slope of Alaska using airborne eddy-covariance measurements and environmental response functions, *Atmospheric Chemistry and Physics* 18, 10007-10023.

#### **Lena Expeditionen: Einbindung neuer deutscher Forschungsgruppen**

Fedorova, I., Chetverova, A., Bolshiyarov, D., Makarov, A., Boike, J., Heim, B., Morgenstern, A., Overduin, P. P., Wegner, C., Kashina, V., Eulenburg, A., Dobrotina, E., Sidorina, I. (2015) Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations, *Biogeosciences* 12, 345-363.

Fofonova, V., Danilov, S., Androsov, A., Janout, M., Bauer, M., Overduin, P. P., Itkin, P., Wiltshire, K. H. (2015) Impact of wind and tides on the Lena River freshwater plume dynamics in the summer season, *Ocean Dynamics* 65, 951-968.

Heim, B., Abramova, E., Doerffer, R., Günther, F., Hölemann, J., Kraberg, A., Lantuit, H., Loginova, A., Martynov, F., Overduin, P. P., Wegner, C. (2014) Ocean colour remote sensing in the southern Laptev Sea: evaluation and applications, *Biogeosciences* 11, 4191-4210.

Kraberg, A., Druzhkova, E., Heim, B., Löder, M., Wiltshire, K. H. (2013) Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography, *Biogeosciences* 10, 7263-7277.

Overduin, P., Wetterich, S., Günther, F., Grigoriev, M. N., Grosse, G., Schirrmeister, L., Hubberten, H.-W., Makarov, A. S. (2016) Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia, *Cryosphere* 10, 1449-1462.

#### Ein Jahrzehnt der Küstenforschung im Lenadelta

Bussmann, I. (2013) Distribution of methane in the Lena Delta and Buor-Khaya Bay, Russia, *Biogeosciences*, 10, 4641-4652

Örek, H., Doerffer, R., Röttgers, R., Boersma, M. and Wiltshire, K. H. (2013) Contribution to a bio-optical model for remote sensing of Lena River water, *Biogeosciences*, 10, 7081-7094

Kraberg, A. C., Druzhkova, E., Heim, B., Loeder, M. J. G. and Wiltshire, K. H. (2012) Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography, *Biogeosciences Discussions*, 9, 1-40

Goncalves-Araujo, R., Stedmon, C. A., Heim, B., Dubinenkov, I., Kraberg, A. C., Moiseev, D. and Bracher, A. (2015) From fresh to marine waters: characterization and fate of dissolved organic matter in the Lena River Delta region, Siberia, *Frontiers in Marine Science*, 2, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.844928>

## 5

#### Die neue Forschungsstation Insel Samoilo: Bau, Eröffnungsfeier, Anlage und Betrieb

Hubberten, H.-W., Grigoriev, M. N. (2014) The new Arctic Research Station "Samoylov Island" in the Lena Delta: Prospects for joint Russian-German Studies, *Nova Acta Leopoldina* 117, 65-76.

#### Samoilov in internationalen Programmen und Netzwerken - FLUXNET, GTN-P, INTERACT

Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoof, G., Westermann, S., Wischniewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998/2011), *Biogeosciences*, 10, 2105-2128.

Boike, J., Nitzbon, J., Anders, K., Grigoriev, M., Bolshiyarov, D., Langer, M., Lange, S., Bornemann, N., Morgenstern, A., Schreiber, P., Wille, C., Chadburn, S., Gouttevin, I., and Kutzbach, L. (2018) A 16-year record (2002-2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2018-82>, in review.

Kutzbach, L., Sachs, T., Boike, J., Wille, C., Schreiber, P., Langer, M., and Pfeiffer, E.-M. (2015) FLUXNET2015 RU-Sam Samoylov, Tech. rep., FluxNet; University of Hamburg; Alfred Wegener Institute; GFZ German Research Centre for Geosciences, <https://doi.org/10.18140/FLX/1440185>.

#### Kurzer Überblick über die russisch-deutschen Permafrost-Projekte CARBOPERM und KoP

Pfeiffer, E.-M., Hubberten, H.-W. (2017) CARBOPERM - Kohlenstoff im Permafrost: Bildung, Umwandlung und Freisetzung, Booklet CARBOPERM-Projekt des BMBF.

Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, *Biogeosciences* 10, 3507-3524.

#### Einsatz von Fernerkundung im Gebiet der Lapteewsee

Antonova, S., Sudhaus, H., Strozzi, T., Zwieback, S., Kääh, A., Heim, B., Langer, M., Bornemann, N., Boike, J. (2018) Thaw Subsidence of a Yedoma Landscape in Northern Siberia, Measured In Situ and Estimated from TerraSAR-X Interferometry, *Remote Sensing* 10, 494.

Kruppen, T., Janout, M., Hodges, K. I., Gerdes, R., Girard-Arduin, F., Hölemann, J. A., Willmes, S. (2013) Variability and trends in Laptev Sea ice outflow between 1992 - 2011, *The Cryosphere* 7, 349- 363.

Langer, M., Westermann, S., Boike, J. (2010) Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of wet polygonal tundra in Siberia - implications for MODIS LST based permafrost monitoring, *Remote Sensing of Environment* 114, 2059-2069.

Muster, S., Langer, M., Heim, B., Westermann, S., Boike, J. (2012) Subpixel heterogeneity of ice-wedge polygonal tundra: a multi-scale analysis of land cover and evapotranspiration in the Lena River Delta, Siberia, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 17301.,

Nitze, I., Grosse, G. (2016) Detection of landscape dynamics in the Arctic Lena Delta with temporally dense Landsat time-series stacks, *Remote Sensing of Environment* 181, 27-41.

**Multidisziplinäre Studien auf Samoilow und Kurungnakh: Geophysik, Fernerkundung, Geologie sowie botanische und Bodenstudien**

Khazin, L. B., Khazina, I. V., Kuzmina, O. B. (2017) Micropaleontological characteristic (ostracods, palynomorphs) of permafrost deposits in borehole on Kurungnakh Island (Lena delta, northeast Siberia), XIII International Scientific Congress Interexpo GEO-Siberia-2017: International Conference "Mineral resources management. Mining Science. Trends and technologies of exploration, prospecting and exploitation of mineral resources. Economics. Geoecology." Book of Abstracts in 4 volumes, 1, 7-11. (in Russian)

Tsibizov, L., Rusalimova, O. (2017) Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, Lena Delta, Russia, Near Surface Geophysics 15, 527-532.

Tsibizov, L., Fage, A., Rusalimova, O., Fadeev, D., Olenchenko, V., Yeltsov, I., Kashirtsev, V. (2017) Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography, Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Reports on Polar and Marine Research 709, 56-69.

Yeltsov, I. N., Olenchenko, V. V., Fage, A. N. (2017) Electrical resistivity tomography in Russian Arctic according to the data from field studies and numerical modeling, Business journal Neftegaz, RU 2, 54-64. (in Russian)

**Terrestrische Permafrost-Bohrkampagnen: Tiefe Einblicke in die Vergangenheit**

Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stoof, G., Westermann, S., Wischniewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W. (2013) Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998-2011), Biogeosciences 10, 2105-2128.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Schnelle, M., Fuchs, M., Krbetschek, M., Ulrich, M., Kunitzky, V., Grigoriev, M., Andreev, A., Kienast, F., Meyer, H., Babiy, O., Klimova, I., Bobrov, A., Wetterich, S., Schwamborn, G. (2011) Late Quaternary paleoenvironmental records from the western Lena Delta, Arctic Siberia, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 299, 175-196.

**Langzeitmessungen der Energie-, Wasser-, und Treibhausgasflüsse zwischen Land und Atmosphäre von 2002 bis heute und darüber hinaus**

Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. (2008) Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: Eddy covariance measurements and modeling, Global Change Biology 14, 1395-1408.

Chadburn, S. E., Krinner, G., Porada, P., Bartsch, A., Beer, C., Belelli Marchesini, L., Boike, J., Ekici, A., Elberling, B., Friborg, T., Hugelius, G., Johansson, M., Kuhry, P., Kutzbach, L., Langer, M., Lund, M., Parmentier, F.-J. W., Peng, S., Van Huissteden, K., Wang, T., Westermann, S., Zhu, D., Burke, E. J. (2017) Carbon stocks and fluxes in the high latitudes: using site-level data to evaluate Earth system models, Biogeosciences 14, 5143-5169.

**Kohlenstoffumsatz von auftauendem Permafrost im Lenadelta**

Höfle, S., Kusch, S., Talbot, H. M., Mollenhauer, G., Zubrzycki, S., Burghardt, S., Rethemeyer, J. (2015) Characterization of bacterial populations in permafrost soils using bacteriohopanepolyols, Organic Geochemistry 88, 1-16.

Höfle S., Rethemeyer, J., Mueller, C. W., John, S. (2013) Organic matter composition and stabilization in a polygonal tundra soil of the Lena-Delta, Biogeosciences 10, 3145-3158.

Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., Pfeiffer, E.-M. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost, Nature Climate Change 8, 309-312.

Walz, J., Knoblauch, C., Böhme, L., Pfeiffer, E.-M. (2017) Regulation of soil organic matter decomposition in permafrost-affected Siberian tundra soils - Impact of oxygen availability, freezing and thawing, temperature, and labile organic matter, Soil Biology and Biochemistry 110, 34-43.

Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Grosse, G., Desyatkin, A., Pfeiffer, E.-M. (2013) Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta, Biogeosciences 10, 3507-3524.

## Impressum

Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Telefon: 04 71 48 31-0  
info@awi.de  
www.awi.de

Telegrafenberg A45  
14473 Potsdam  
Telefon: 0331 288-2100

Herausgeber:  
Hans-Wolfgang Hubberten, Dmitry Yu. Bolshiyarov,  
Mikhail N. Grigoriev, Guido Grosse, Anne Morgenstern,  
Eva-Maria Pfeiffer, Volker Rachold, Lutz Schirrmester

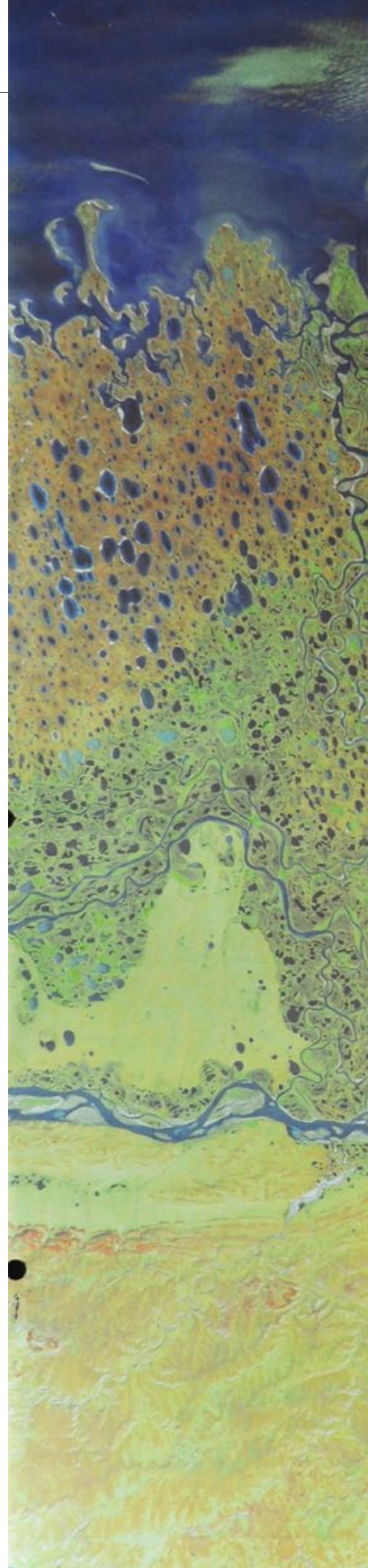
Gestaltung: Glinsmann Design, Bremen  
Druck: BerlinDruck GmbH + Co KG, Achim

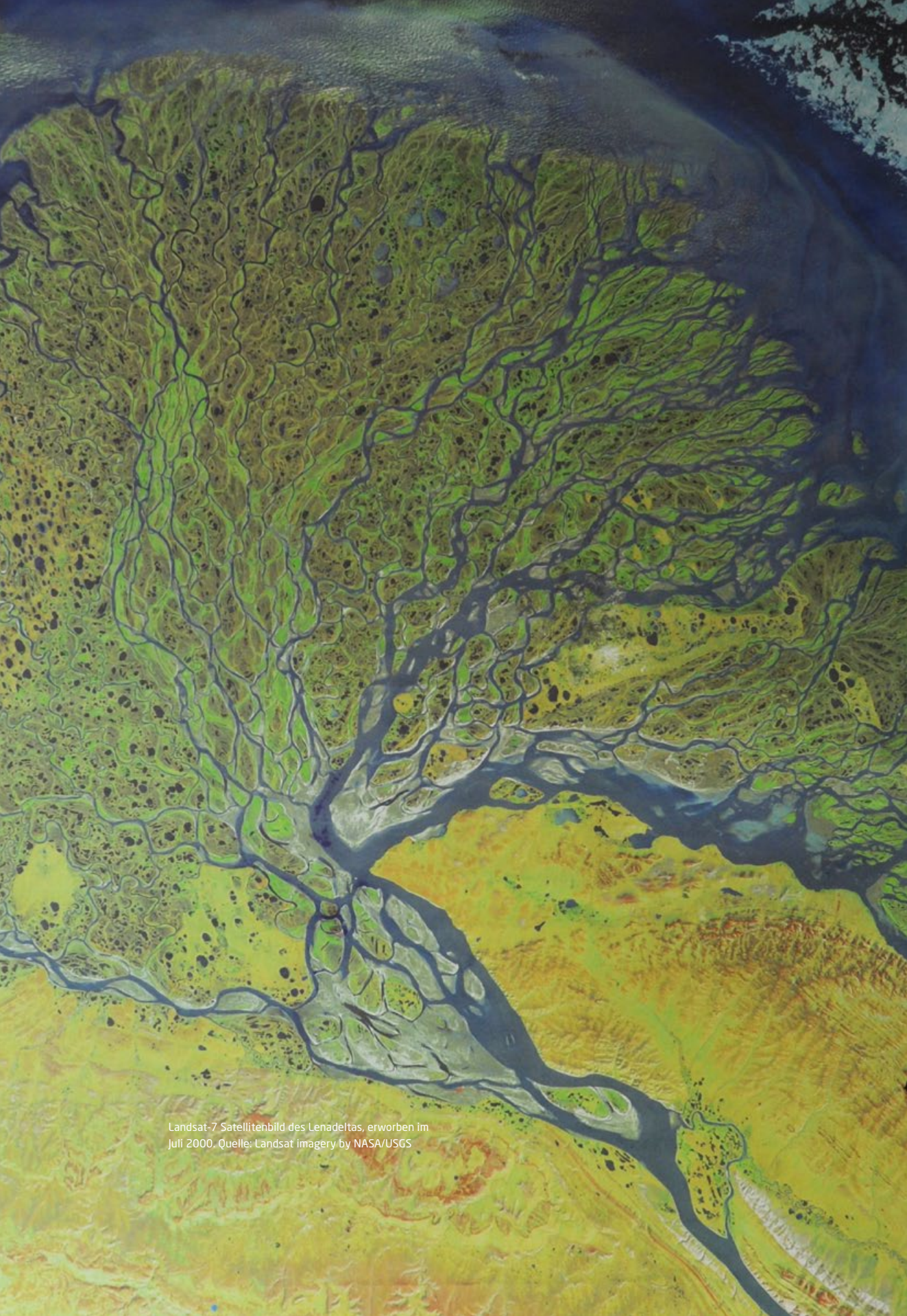
Fotonachweise:  
Umschläge: T. Opel, G. Stoof, P. Verzone, C. Fiencke, V.  
Kochan/RBB, T. Sachs, J. Strauss, J. Boike  
Seite 49 ff., Tierillustrationen: © fotolia.com: Tetiana,  
Viktoria, frilled\_dragon, Vlad Klok, Perysty, K. Piel

Einige Karten in diesem Heft wurden mit der ArcGIS®-  
Software von Esri erstellt. ArcGIS® und ArcMap™  
sind geistiges Eigentum von Esri und werden hierin  
unter Lizenz verwendet. Copyright © Esri. Alle Rechte  
vorbehalten. Für weitere Informationen über die Esri®-  
Software besuchen Sie bitte [www.esri.com](http://www.esri.com).

Wenn nicht anders angegeben, stammen die Fotos und  
Abbildungen in den jeweiligen Kapiteln von den Autoren.

Copyright: 2018, Alfred-Wegener-Institut  
ISBN 978-3-88808-716-5





Landsat-7 Satellitenbild des Lenadeltas, erworben im Juli 2000. Quelle: Landsat imagery by NASA/USGS



1998 | 1999 | 2000

2001 | 2002 | 2003 | 2004

2005 | 2006 | 2007







2008 | 2009 | 2010

2011 | 2012 | 2013 | 2014

2015 | 2016 | 2017





ALFRED-WEGENER-INSTITUT  
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-  
UND MEERESFORSCHUNG

# HELMHOLTZ

ISBN 978-3-88808-716-5

