

*Polarforschung* 81 (1), 11 – 22, 2011 (erschienen 2012)

## Arktische Permafrostküsten und submariner Permafrost im Wandel

von Sebastian Wetterich<sup>1</sup>, Paul Overduin<sup>1</sup> und Hugues Lantuit<sup>1</sup>

**Kurzfassung:** Küsten stellen eine Grenze zwischen marinen, terrestrischen und atmosphärischen Systemen dar. Sie unterliegen Veränderungen, die sich aus dem komplexen Wechselspiel der jeweils systemspezifischen Steuergrößen ergeben. Die von Permafrost geprägten Küsten der Arktis werden im Rahmen nationaler, bilateraler und internationaler Forschungs-Programme und -Projekte untersucht. Ein besonderer aktueller Untersuchungsgegenstand der Permafrostforschung in diesem Umfeld betrifft den submarinen Permafrost der arktischen Schelfmeere in seiner Wechselwirkung zwischen überflutetem terrestrischen Permafrost und dem Meerwasser. In diesem Artikel werden die wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge zum Verständnis der Dynamik arktischer Permafrostküsten und des submarinen Permafrosts an Forschungsbeispielen erläutert, die aktuellen Veränderungen in diesem klimasensiblen System präsentiert sowie neue Fragen und moderne Forschungsfelder aufgezeigt.

**Abstract:** As the boundary between marine, terrestrial and atmospheric systems, the arctic coastal zone reacts sensitively to environmental changes, and is subject to a complex interplay of different, system-specific controlling variables. Dominated by permafrost, most of the arctic coastal zone is undergoing significant changes, which are the focus of national, bilateral, and international research programs and projects. A more recent object of research examines the submarine permafrost of the arctic shelf seas and the interaction between flooded terrestrial permafrost and the sea-water. In this article, the key concepts and contexts for understanding the dynamics of arctic permafrost coasts and submarine permafrost are discussed in the context of specific research studies. Current changes in this climate-sensitive system are described and emerging issues and fields of research are identified.

### KÜSTENEROSION IN DER ARKTIS

Küstendynamische Prozesse in der Arktis unterscheiden sich von denen in südlicheren Breiten im Wesentlichen durch das Vorhandensein von Eis auf dem Meer und im Untergrund des Festlandes. Beide Faktoren können Erosionsprozesse an den Küsten und damit verbundenen Sedimenttransport in Abhängigkeit von der Jahreszeit begünstigen oder hemmen. Ab etwa Mitte Oktober bildet sich initiales Meereis (*frazil ice, slush ice*), das jedoch noch keine zusammenhängende Eisdecke darstellt. Im Zusammenwirken mit Herbststürmen und erhöhter Wellenaktivität hat initiales Meereis hohen Einfluss auf den küstennahen Materialtransport und die Küstenerosion (ARE et al. 2008). Über einen großen Teil des Jahres (November bis Mai) sind arktische Küstenbereiche fest eingefroren und somit vor Erosion geschützt. Nur in den Sommermonaten (Juni bis September) sind die küstennahen Meeresbereiche eisfrei und Wellen können die Küsten angreifen. Diese Materialverlagerung wird als Thermoabrasion bezeichnet und

erfolgt unter dem Einfluss des relativ warmen Meerwassers und der mechanische Wirkung der Wellen. Gleichzeitig wird im Sommer der an Küsten exponierte Permafrost oberflächlich aufgetaut ein Prozess, der zum Küstenabtrag führt und als Thermodenudation bezeichnet wird.

Im Rahmen gemeinsamer russisch-deutscher Forschungsexpeditionen werden seit 1998 vom Permafrostinstitut in Jakutsk und dem Alfred-Wegener-Institut (AWI) in Potsdam küstendynamische Prozesse in der Lapteewsee in Ostsibirien untersucht (z.B. OVERDUIN et al. 2007, ARE et al. 2008, LANTUIT et al. 2011a). Darüber hinaus werden seit 2003 vom AWI gemeinsam mit kanadischen Forschern der McGill University Erosionsprozesse in der Beaufortsee erforscht (z.B. LANTUIT & POLLARD 2008). Zudem werden bilaterale Forschungsprojekte und langfristige, internationale Beobachtungsprogramme zur Veränderung arktischer Permafrostküsten vom AWI in Potsdam koordiniert und umgesetzt.

Küstenerosion in der Arktis wird durch vor-Ort-Messungen und Fernerkundungsmethoden (Luft- und Satellitenbilder) beobachtet und gemessen (Abb. 1). Dabei wird auf sehr unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen gearbeitet, wodurch Beobachtungsreihen zur Küstenerosion am ehesten einen Mittelwert bzw. die Integration zahlreicher Ereignisse darstellen.

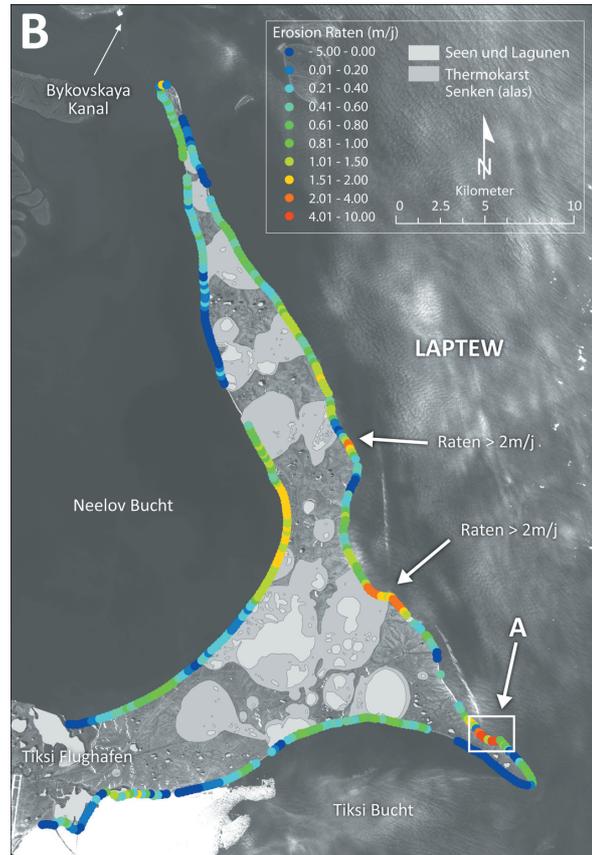
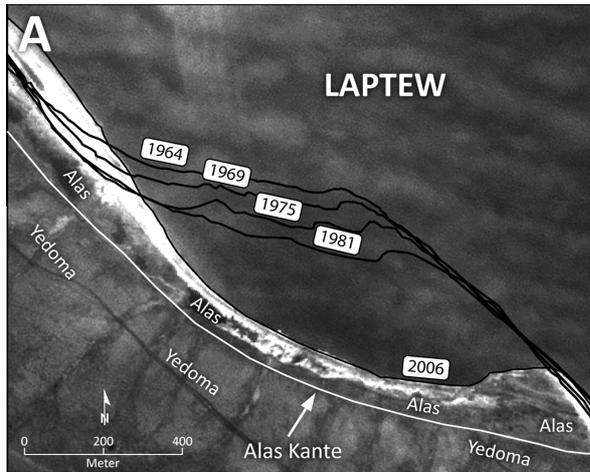
Der aktuelle Wissenstand zur Küstendynamik in der Arktis, der im letzten Jahrzehnt im Rahmen des internationalen Arctic Coastal Dynamics Project (ACD) gesammelt wurde, ist von LANTUIT et al. (2011b) zusammengefasst. Die jährlichen Erosionsraten im dekadischen Beobachtungszeitraum liegen in weiten Teilen der Arktis typischerweise bei 1 bis 2 m pro Jahr (Abb. 2, LANTUIT et al. 2011b). Lokale Besonderheiten können jedoch zu Erosionsraten von 10 bis 30 m pro Jahr führen (z.B. JONES et al. 2009). Eine wichtige Rolle spielen dabei Sturmereignisse während der Sommermonate (ARP et al. 2010), die den Meeresspiegel relativ ansteigen lassen, kurzzeitig die Wellenwirkung auf die Küste intensivieren und in exponierten Bereichen einen extremen Küstenabtrag verursachen.

Erosionsraten variieren erheblich im zirkumarktischen Maßstab aber auch auf lokaler Ebene durch unterschiedliche Kombination geologischer, biologischer und geomorphologischer Eigenschaften, die wiederum auf klimatische und ozeanische Bedingungen verschieden reagieren. Insbesondere sind dabei Sedimenttyp, Eisgehalt, Bewuchs, Hangneigung und Kliffhöhe der jeweiligen Küste entscheidend.

Wie auch in den mittleren Breiten stellen Wellen- und Strö-

<sup>1</sup> Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Forschungsstelle Potsdam, Telegrafenberg A43, 14473 Potsdam; <paul.overduin@awi.de>, <sebastian.wetterich@awi.de>, <hugues.lantuit@awi.de>

Manuskript eingereicht am 26. Mai 2011, überarbeitet zum Druck angenommen am 15. November 2011.



**Abb. 1:** Erosionssequenz zwischen 1964 und 2006 an der Küste einer Thermokarstsenke (Alas) im Südostteil der Bykovsky Halbinsel, Laptevwsee (A) und Erosionsraten an der Permafrostküste der Halbinsel (B) (aus LANTUIT et al. (2011b).

**Fig. 1:** An erosional sequence between 1964 and 2006 on the shoreline of a thermokarst basin (Alas) in the southeastern part of Bykovsky Peninsula, Laptev Sea and coastal erosion rates on the shores of the peninsula (B) (from LANTUIT et al. 2011b).



**Abb. 2:** Zirkumarktische Karte der Küstenerosionsraten (verändert nach LANTUIT et al. 2011a). A = Elson-Lagune, Barrow (Alaska), eine erodierende Küste mit freiliegenden Eiskeilen und überhängenden Tundramatten (Foto: A. Mahoney). B = Bol'shoy-Lyakhovsky-Insel (Ostsibirien), Eiskomplex mit großen Eiskeilen, die einen Eiswall an der Küste bilden (Foto: M. Grigoriew). C = Kondratewa-Mündung (Ostsibirien), Mammutstoßzahn, der aus den gefrorenen Sedimenten ausgetaut ist (Foto: V. Rachold). D = Kolguev-Insel (Westsibirien), hohe Terrassen an der Thermoerosionsküste (Foto: A. Kizyakow, M. Leibman).

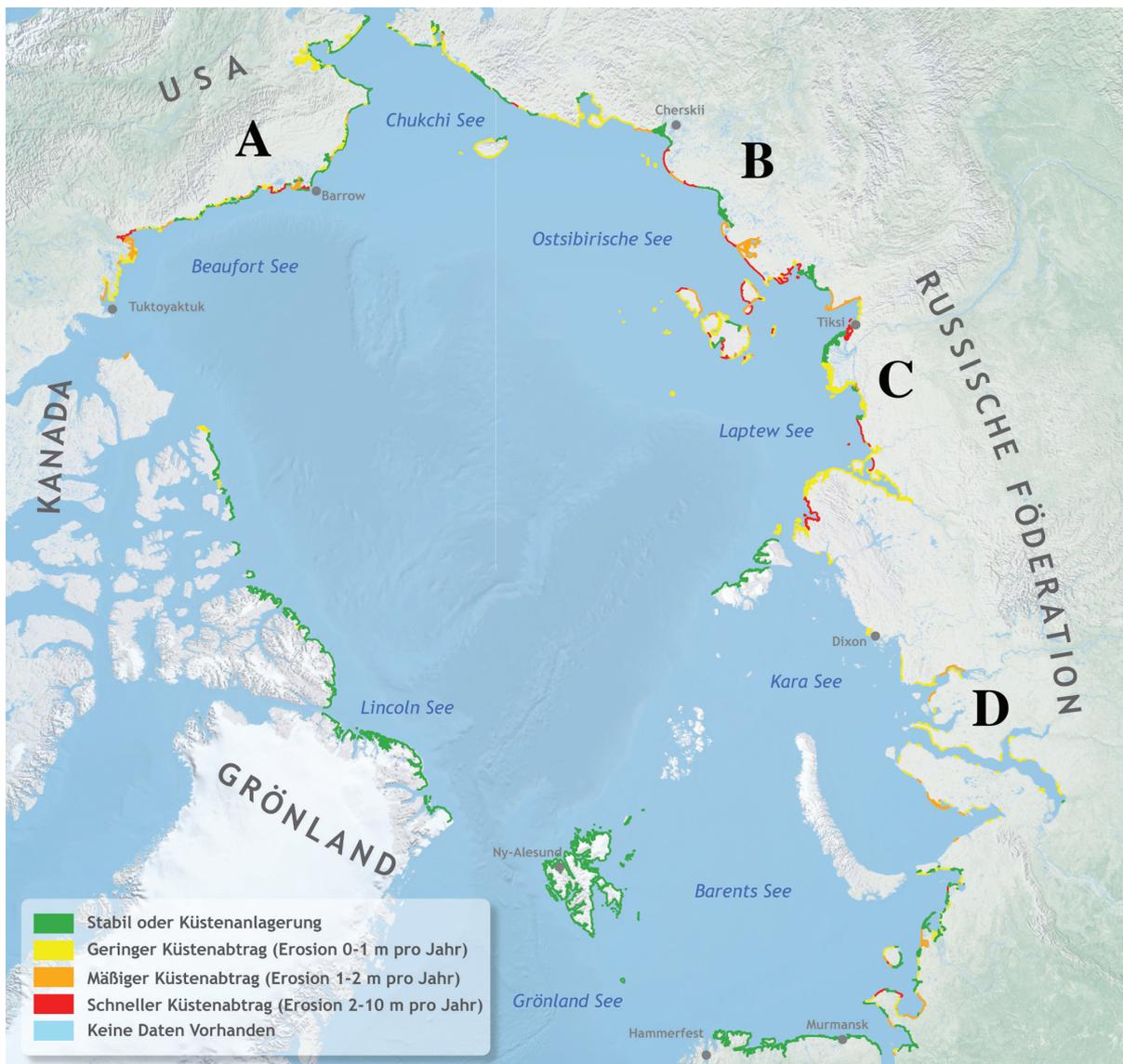
**Fig. 2:** Circumarctic map of coastal erosion rates (modified from LANTUIT et al. 2011a). A = Elson Lagoon, Barrow (Alaska); eroding coast with exposed ice wedges and overhanging tundra mats (Photo: A. Mahoney). B = Bol'shoy Lyakhovsky Island (East Siberia); Ice Complex with huge ice wedges forming a steep coastal cliff (Photo: M. Grigoriew). C = Kondrateva River mouth (East Siberia); mammoth tusk released from thawed permafrost (Photo: V. Rachold). D = Kolguev island (West Siberia); high terraces of the thermo-erosional coast (Photo: A. Kizyakow, M. Leibman).



mungstätigkeit sowie die Höhe des Meeresspiegels die hauptsächlichen Einflussfaktoren der arktischen Küstendynamik dar. Derzeit ist der Einfluss des globalen Klimawandels auf die Erosion arktischer Küsten nur sehr unklar zu beschreiben. Studien in der kanadischen Arktis belegen keine statistisch abgesicherte Zunahme der Erosion im dekadischen Mittel seit den 1970er Jahren (SOLOMON 2005). In der westsibirischen Arktis an der Küste der Karasee wurden dagegen zyklische Muster in der Zu- und Abnahme der Erosionstätigkeit beobachtet, die mit regionalen und globalen Oszillationen in klimatischer Parameter in Zusammenhang gebracht werden (VASILIEV et al. 2005). Eine Verdopplung der Erosionsraten in den letzten 40 Jahren wurde an der Küste der Beaufortsee in Alaska festgestellt und mit abnehmender Meereisbedeckung, steigendem Meeresspiegel, zunehmender Oberflächenwassertemperatur und Sturmintensität erklärt (JONES et al. 2009).

Aktuelle Studien zur Erosion an der Küste der Beaufortsee in Alaska betonen die hohe Variabilität in Stoff- und Materialtransport (insbesondere Nährstoffe und organisches Material). Diese erklärt sich aus der unterschiedlichen Küstenmorphologie und -höhe, aus der Dauer der eisfreien sommerlichen Periode und aus den Erosionsraten an unterschiedlichen Küstentypen (PING et al. 2011). Der mittlere Küstenabtrag wurde durch die Auswertung von Luft- und Satellitenbildern mit ca. 0,6 m pro Jahr zwischen 1950 und 1980 und mit ca. 1,2 m pro Jahr zwischen 1980 und 2000 bestimmt (PING et al. 2011).

Insgesamt gestaltet sich die Quantifizierung der Erosionsraten arktischer Küsten im überregionalen Kontext schwierig, da für ein riesiges Gebiet lediglich nur sehr begrenzt vorliegende lokale bis regionale Beobachtungsreihen genutzt werden können. Letztere können in ihrer räumlichen Aussage von



einem Kilometer Küstenlänge bis zu mehreren tausend Kilometern reichen und unterschiedlich lange Zeiträume zwischen wenigen Jahren bis zu mehreren Dekaden umfassen. Die in Abhängigkeit von den verfügbaren Daten (vor-Ort-Messungen, Luft- und Satellitenbilder) meist unregelmäßigen Beobachtungszeitpunkte erschweren Aussagen zur zeitlichen Dynamik von Küstenprozessen. Die Anzahl der Beobachtungslokalitäten ist sehr gering, so dass generelle Aussagen in Bezug auf den Klimawandel und seine Auswirkungen auf arktische Küsten schwierig sind.

### SUBMARINER PERMAFROST

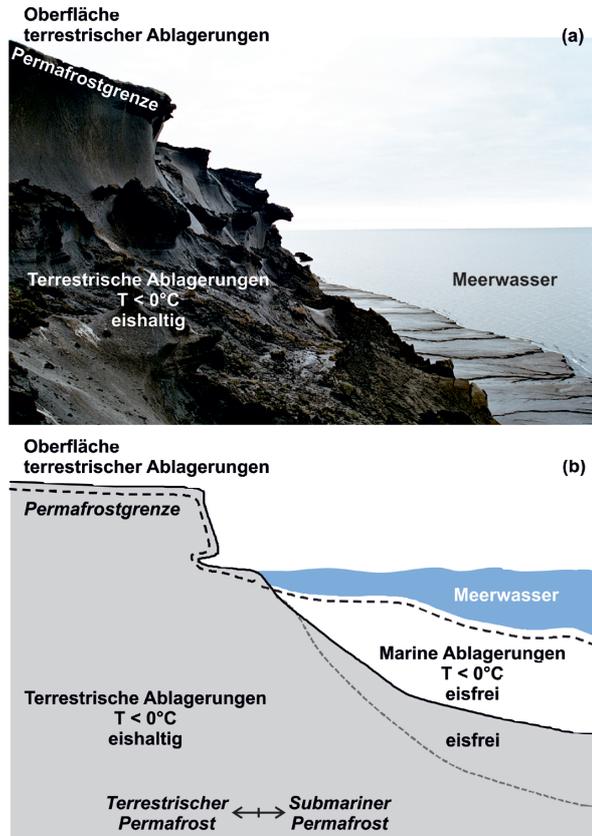
Der Begriff „Submariner Permafrost“ bezieht sich auf Permafrost der unterhalb des Meeresbodens auftritt. Er ist durch langjährige Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  gekennzeichnet (kryotisch, VAN EVERDINGEN 1998) und kann eisgebunden oder eisfrei vorkommen. Submariner Permafrost bildet sich entweder bei negativen Wassertemperaturen am Meeresgrund oder stellt reliktschen Permafrost dar, der unter terrestrischen Bedingungen bei Meeresspiegelmrückgang (Regression), z.B. während der Kaltzeiten in der jüngeren Erdgeschichte gebildet und später im Zuge von Meeresspiegelanstieg (Transgression) während der Warmzeiten vom Meer überflutet wurde.

Reliktischer Permafrost umfasst den weitaus größten Anteil des submarinen Permafrostes im Untergrund der arktischen flachen Schelfmeere. Die Verbreitung und der Aufbau von submarinem Permafrost werden meist durch Bohrungen in den Meeresboden untersucht. Zudem werden schiffsbasierte geophysikalische Methoden (z.B. Reflexionsseismik) eingesetzt, um die Grenze zwischen gefrorenem (eishaltigem) und ungefrorenem (eisfreiem) Material im Untergrund zu bestimmen (Abb. 3) und eine größere räumliche Auflösung der submarinen Permafrostverbreitung zu erreichen (REKANT et al. 2005, 2009).

Der submarine Permafrost wird von deutschen Wissenschaftlern vor allem in Zusammenarbeit mit russischen Institutionen bereits seit den 1990er Jahren erforscht. Dazu gehören sowohl die Modellierung der Permafroststabilität auf dem Schelf der Laptewsee (z.B. ROMANOVSKII et al. 2000, 2005, HUBBERTEN & ROMANOVSKII 1998) als auch geophysikalische Erkundungen auf den Schelfmeeren im Rahmen der russisch-deutschen Transdrift-Expeditionen mit Forschern aus Kiel (IFM-GEOMAR), Bremerhaven (AWI) und St. Petersburg (AARI) (Kassens et al. 1999). Weiterhin wurden 2005 Wechselwirkungsprozesse im küstennahen submarinen Permafrost im Rahmen der russisch-deutschen Bohrkampagne COAST I in der westlichen Laptewsee erforscht (RACHOLD et al. 2007, OVERDUIN et al. 2007).

Bestehende Verbreitungskarten von submarinem Permafrost (Abb. 4) beziehen neben großklimatischen Einflussfaktoren auch geomorphologische und paläogeographische Aspekte ein. Dabei werden die Permafrostmächtigkeiten der jüngeren geologischen Vergangenheit mit den Meeresspiegelschwankungen auf dem Schelf entsprechend der Glazial-Interglazial-Zyklen und neotektonischen Bewegungen zusammengeführt (ÖSTERKAMP 2001, ROMANOVSKII et al. 2000).

Da die Stabilität von Permafrost allgemein vom Temperaturre-

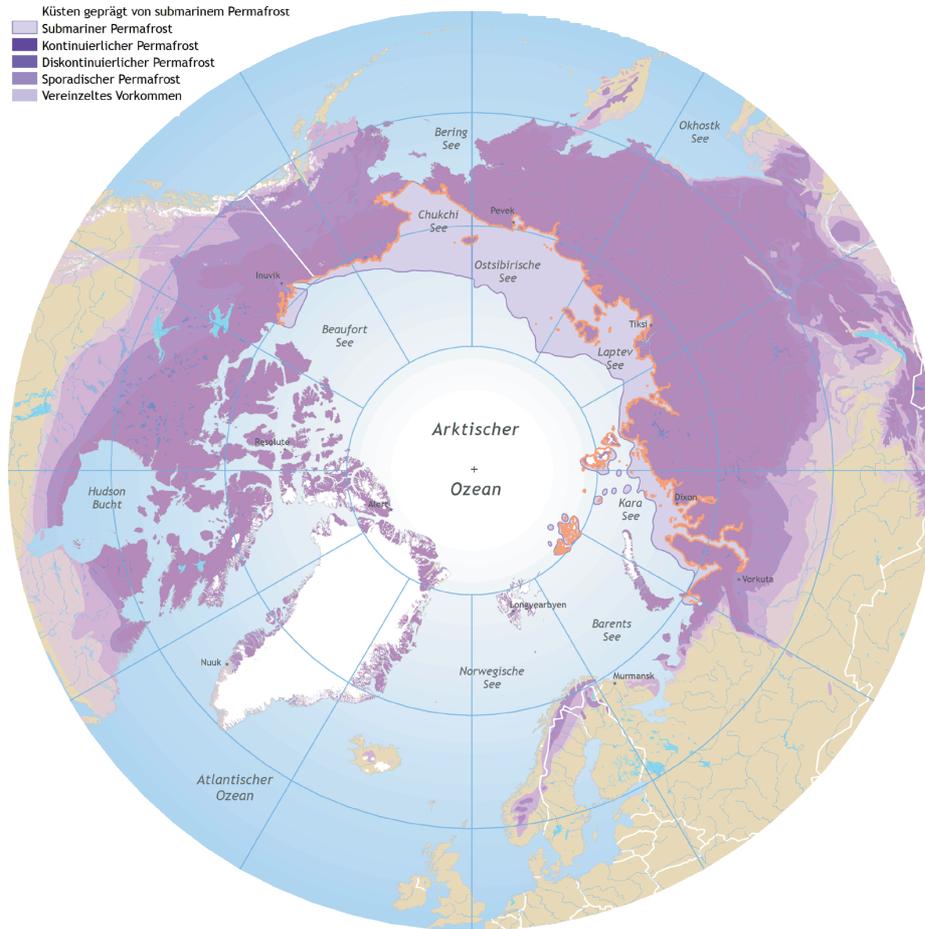


**Abb. 3:** Aufbau der arktischen Permafrostküsten. (a) = Beispiel von der Südküste der Bol'shoy-Lyakhovskiy-Insel (Neusibirischer Archipel) im Juli 2007 (Foto: S. Wetterich). (b) = Schematischer Aufbau und Eigenschaften der Permafrostküsten. Die Verteilung der Sedimenttypen im Küstenbereich zeigt die Permafrostgrenze landwärts entsprechend der maximalen sommerlichen Auftautiefe und seawärts an der Grenze Sediment zu Wasser. Das submarine Sediment ist entsprechend seiner Temperatur ständig unterhalb von  $0^{\circ}\text{C}$  als Permafrost definiert (kryotisch, VAN EVERDINGEN 1998), auch wenn es teilweise ungefroren ist. Reliktischer, terrestrischer Permafrost findet sich in einiger Tiefe unterhalb des Meeresbodens und ist teilweise durch Erwärmung und Salzdifffusion getaut.

**Fig. 3:** Composition of Arctic permafrost coasts. (a) = example at the southern coast of Bol'shoy Lyakhovskiy Island (New Siberian Archipelago) in July 2007 (photo S. Wetterich). (b) = schematic representation of a permafrost coast. The distribution of sediment types in the near shore zone shows a permafrost table that corresponds to the maximum summer thaw depth landward of the coastline, and to the seabed on the marine side. The subsea sediment, although partially unfrozen (ice-free), is considered permafrost as long as its temperature is perennially less than  $0^{\circ}\text{C}$  (cryotic, VAN EVERDINGEN 1998). Terrestrial permafrost is thus found at some depth beneath the seabed, potentially partially thawed (ice free) by warming or the effect of salt diffusion into the sediment.

gime abhängt, wird die potentielle Permafrostverbreitung und Mächtigkeit einerseits von der Intensität der geothermalen Flüsse aus dem Erdinneren abgeleitet (ROMANOVSKII & HUBBERTEN 2001). Andererseits liegen die für die Verteilung des submarinen Permafrostes entscheidenden Temperaturverhältnisse an ihrer oberen Grenze; sie werden durch die Oberflächentemperatur des Meeresbodens bestimmt, die wiederum von der Temperatur des Meerwassers abhängt.

Steigende Umgebungstemperaturen beeinflussen zwangsläufig das thermale Regime des Permafrostes, der sich dann ebenfalls erwärmt und gegebenenfalls taut, um das thermale



**Abb 4:** Zirkumarktische Verbreitung von terrestrischem und submarinem Permafrost, sowie der von Permafrost beeinflussten Küsten (nach OVERDUIN et al. 2011, nach BROWN et al. 1998).

**Fig. 4:** Circumarctic distribution of terrestrial and submarine permafrost, highlighting the coasts affected by the presence of permafrost (after OVERDUIN et al. 2011, based on BROWN et al. 1998).

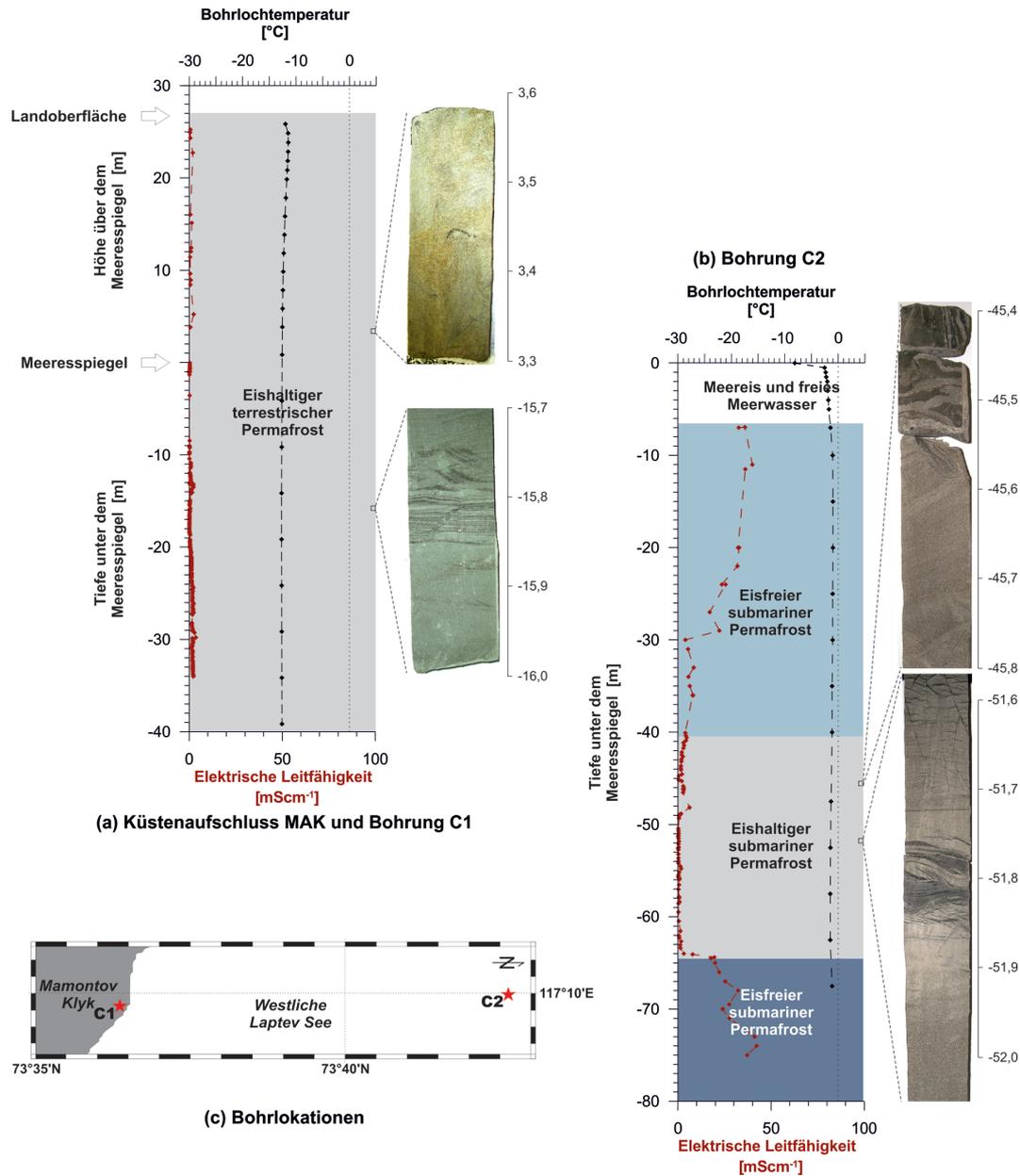
Gleichgewicht mit der Umgebungstemperatur wieder herzustellen. Dieser Prozess kann tausende Jahre dauern; er begann für den heutigen submarinen Permafrost bereits mit der marinen Transgression seit dem letzten glazialen Maximum (BAUCH et al. 2001). Hohe Küstenerosionsraten in der Arktis setzen diese Überflutung bis heute fort, wobei die Küstenmorphologie, die Lithologie der erodierten Küste und hydrodynamische Prozesse Einfluss auf die Degradation des submarinen Permafrostes haben (GRIGORIEV 2006). Im Vergleich zum terrestrischen Permafrost bei Kap Mamontov Klyk (73°36'22" N, 117°10'38" E) ist der submarine Permafrost in der westlichen Laptevsee ca. 12 °C wärmer (Abb. 5). Diesen Daten zufolge hat der submarine Permafrost bis in eine Tiefe von mehreren zehner Metern sein thermisches Gleichgewicht bereits erreicht, das im salzigen Meerwassermilieu bei ca. -2 bis -1° C liegt. Jede weitere Erwärmung – zum Beispiel durch steigende Bodentemperaturen – im Gefolge des aktuellen Klimawandels, würde unweigerlich zur Destabilisierung des submarinen Permafrostes führen.

Neben dem thermischen Einfluss des Meerwassers auf den submarinen Permafrost wird dessen Stabilität auch durch den Salzgehalt des Meerwassers beeinflusst. Da unter salzigen Bedingungen der Taupunkt herabgesetzt wird, taut das Eis im eisgebundenen Permafrost auch wenn dieser negativ temperiert ist. Das sukzessive Eindringen salziger Lösungen destabi-

liert Permafrost also über den thermischen Einfluss des Meerwassers hinaus (GOSINK & BAKER 1990). Diese geochemische Degradation des Permafrostes ist im Beispiel aus der westlichen Laptevsee zu erkennen (Abb. 5b). Hier lässt sich der marine Einfluss durch die Infiltration salziger Porenwässer bis in eine Tiefe von 40 m unter dem Meeresspiegel nachweisen und markiert die Grenze zwischen eisgebundenem und eisfreiem Permafrost.

Der zeitliche Aspekt der Degradation von submarinem Permafrost am Beispiel der westlichen Laptevsee lässt sich erfassen wenn man die regionale Transgressionsgeschichte (BAUCH et al. 2001) berücksichtigt und heutige Erosionsraten am Kap Mamontov Klyk von 4,5 bis 5 m pro Jahr einbezieht. Der terrestrisch gebildete Permafrost, der sich im unteren Bereich des 12 km vor der heutigen Küste erbohrten Kerns C2 findet, wurde demnach vor ca. 2500 Jahren überflutet. Er degradiert seitdem mit einer Rate von ca. 1 cm pro Jahr, mit der sich der marine Einfluss des warmen und salzigen Meerwassers in die Tiefe fortsetzt.

Zunehmend wird die Bedeutung des submarinen Permafrostes als Methanquelle erkannt und untersucht (z.B. ROMANOVSKII et al. 2005, LEIFER et al. 2006, SHAKHOVA et al. 2010a, 2010b). Methan ist ein klimawirksames Gas, das im marinen Untergrund insbesondere der arktischen Schelfgebiete überwiegend



**Abb 5:** Vergleich der thermischen und geochemischen Charakteristika von terrestrischem und submarinem Permafrost in der westlichen Laptevsee (RACHOLD et al. 2007, OVERDUIN et al. 2007). (c) = Lage des Landprofils Mamontov Klyk (MAK) und der Bohrung C1 an Land sowie der Bohrung C2 in 12 km Entfernung von der Küste. (a) = Bohrlochtemperaturen an Land (in Sedimentkern C1) und unter dem Meer (in Kern C2). (b) = elektrische Leitfähigkeit (rote Kurve) = Salzgehalt der Porenwässer bzw. des Poreneises der Sedimente in den Kernen C1 und C2. Detailfotos ausgewählter Kernabschnitte von C1 und C2 zeigen Teile von Sand-Eis-Keilen (jeweils obere Darstellung) und fein geschichtete Sande mit postsedimentär gebildeten Eisadern (jeweils untere Darstellung) für die Land- und die Meerbohrkerne (WINTERFELD et al. 2011).

**Fig. 5:** Comparison of temperature and geochemical characteristics of terrestrial and submarine permafrost in the western Laptev Sea (RACHOLD et al. 2007, OVERDUIN et al. 2007). (c) = locations of drill sites in the western Laptev Sea. (a) = drill hole temperatures on land (core C1) and subsea (core C2, in 12 km distance from the shore). (b) = salt content expressed as electrical conductivity (red curve) in pore water or pore ice in sediments of cores C1 and C2. Close-up photographs of selected C1 and C1 core sections show parts of sand-ice-wedges (always upper examples) and bedded sands with post-sedimentary ice veins (WINTERFELD et al. 2011).

als Gashydrat gespeichert ist (SHAKHOVA & SEMILETOV 2009, MASLIN et al. 2010), wobei Gashydrate chemische Strukturen sind, bei denen Gasmoleküle in Kristallstrukturen des Wassers gefangen und unter bestimmten Temperatur- und Druckbedingungen stabil sind (KVENVOLDEN 1995).

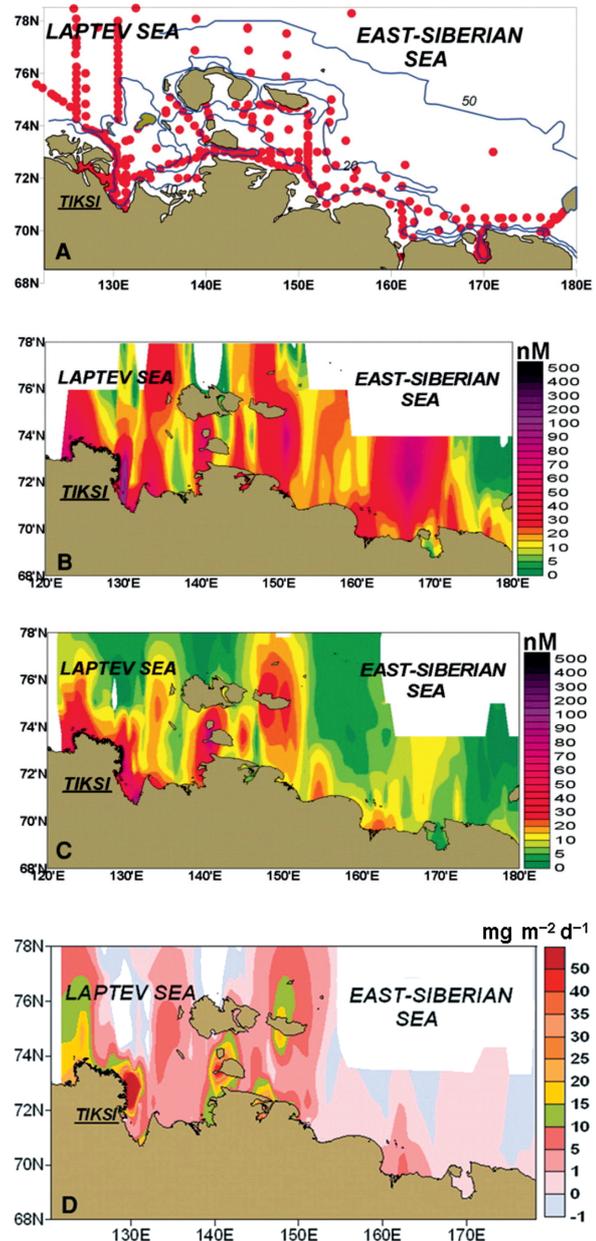
Der submarine Permafrost der arktischen Schelfmeere wird als bedeutendes Gashydrat-Reservoir angesehen (O'CONNOR et al. 2010), das groben Schätzungen zufolge 2 bis 65 Petagramm ( $10^{15}$  g) Methan umfasst (MCGUIRE et al. 2009). Dass Teile dieser enormen Methanvorkommen des Ostsibirischen Schelfs freigesetzt werden können, zeigen aktuelle Daten von SHAKHOVA et al. (2010a) von mehr als 5000 Messpunkten an 1080 Stationen aus den Sommern 2003 bis 2008 (Abb. 6) und dem Winter 2007. Bisher ist jedoch noch ungeklärt, welchen Anteil die zersetzten reliktsichen Gashydrate bzw. das durch rezente mikrobielle Aktivitäten an der Meeresbodenoberfläche oder in oberflächennahen Sedimenten gebildete Methan haben. Als Transportweg für das Methan aus zersetzten Gashydraten werden ganzjährig aktive Taulozonen (Taliks) im submarinen Permafrost angenommen, durch welche seicht lagernde Gashydrate und geologische Methanquellen in die Wassersäule und dann in die Atmosphäre emittieren. Die Permafrostdegradation seit der Überflutung der Schelfe und unterschiedliche Permafrostmächtigkeiten scheinen die wesentlichen Kontrollfaktoren für die Transportwege von Methan im submarinen Permafrost zu sein. Eine Freisetzung dieser Methanvorkommen, die im submarinen Permafrost über tausende Jahre fixiert waren, hätte wesentlichen Einfluss auf das jährliche Methanbudget mit globalen Auswirkungen.

#### AKTUELLE VERÄNDERUNGEN IM SUBMARINEN- UND KÜSTEN-MILIEU DER ARKTIS

Die Küstenlinie der Arktis erstreckt sich über etwa 100.000 km Länge und unterscheidet sich von den Küsten der mittleren und südlichen Breiten durch das Vorhandensein und das Einwirken von Eis, das einerseits als Grundeis den überwiegenden Anteil der weit verbreiteten Permafrostküsten ausmacht und andererseits als Meereis den Arktischen Ozean den größten Teil des Jahres bedeckt (Abb. 7).

Die Permafrostküsten repräsentieren ca. 65 % der Küstenlinie in der Arktis (ca. 34 % der Küstenlinie in der Welt, LANTUIT et al. 2011a) und sind geprägt durch hohe Eisgehalte im Untergrund und saisonale Meereisdynamik (Abb. 4). Beides bedingt Besonderheiten in der Küstendynamik, der Erosion und Stoffverlagerung. Derzeit existieren keine längeren Beobachtungszeitreihen zu Veränderungen an den arktischen Küsten und des submarinen Permafrostes im zirkumpolaren Maßstab. Der aktuelle Kenntnisstand speist sich im Wesentlichen aus lokalen Beobachtungen in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Allgemeine Trends der derzeitigen Klimaerwärmung in der Arktis beeinflussen jedoch den Zustand und die Dynamik der arktischen Küsten und Meere zunehmend und werden unter anderem von den im Folgenden aufgeführten Komponenten und Prozessen kontrolliert.

Eine kürzlich erschienene und frei verfügbare Zusammenfassung des aktuellen Wissensstandes (FORBES 2011) wurde als *State of the Arctic Coast* veröffentlicht. Forschungen zur Küstendynamik und zum submarinen Permafrost unter Betei-



**Abb. 6:** Sommerdaten von gelöstem Methan im Bereich des ostsibirischen Schelfs (aus SHAKHOVA et al. 2010a, Drucklizenz 2772520690091, AAAS). (A) = Position der ozeanographischen Stationen in der östlichen Lapteewsee und der Ostsibirischen See, Tiefenlinien (blau) für 10, 20 und 50 m. (B) = gelöstes Methan im Bodenwasser. (C) = gelöstes Methan im Oberflächenwasser. (D) = Methanflüsse zur Atmosphäre über dem Schelf.

**Fig. 6:** Summertime observations of dissolved methane in the East Siberian Arctic Shelf region (from SHAKHOVA et al. 2010a, reprint license 2772520690091, AAAS). (A) = positions of oceanographic stations in the eastern Laptev Sea and East Siberian Sea; depth contours (blue) for 10, 20 and 50 m. (B) = dissolved methane in bottom water. (C) = dissolved methane in surface water. (D) = methane fluxes venting to the atmosphere over the East Siberian Arctic Shelf region.



**Abb. 7:** Mittlere maximale (orange) und minimale (hellblau) Meereisverbreitung zwischen 1979 und 2000, Jahresminimum im September 2007 (dunkelblau) und vorhergesagtes Meereisminimum für 2070 bis 2090 (grau). Aus OVERDUIN et al. 2011, basierend auf Daten von NSIDC und ACIA (2005).

**Fig. 7:** Median maximum (orange) and minimum (light blue) sea-ice extents for 1979-2000, annual sea ice minimum for 2007 (dark blue) and projected minimum sea-ice extent for 2070-2090 (grey). From OVERDUIN et al. 2011, based on data from NSIDC and ACIA (2005).

ligung deutscher Wissenschaftler werden momentan und in der Zukunft im Rahmen von Russisch-Deutschen Wissenschaftskooperationen vornehmlich in der Lapteewsee-Region realisiert (WETTERICH et al. 2010). Dabei liegen die Schwerpunkte auf der geophysikalischen Erkundung des Aufbaus, der Zusammensetzung und Degradation des küstennahen submarinen Permafrostes, sowie auf der genauen Erfassung von Küstenerosionsraten mit Hilfe von Geländemodellen und hochauflösenden Satellitendaten.

Ein weiteres Untersuchungsgebiet zu küstendynamischen Prozessen in der Arktis im Rahmen kanadisch-deutscher Zusammenarbeit liegt in der kanadischen Beaufortsee, wo am Beispiel der Herschel-Insel Erosionsraten und Materialtransport vom Land ins Meer im Hinblick auf thermo-mechanische Prozesse im tauenden Permafrost, schmelzendes Grundeis und Wellenwirkung untersucht werden (LANTUIT & POLLARD 2005, 2008).

*Steigende Luft- und Meerwassertemperaturen*

Die Jahresamplitude der bodennahen Lufttemperaturen an arktischen Küsten reicht von ca. -50° C im Winter bis zu ca. 20° C im Sommer. Steigende Lufttemperaturen in den letzten

Jahrzehnten sind in der Arktis relativ gut dokumentiert und werden mit der globalen Erwärmung assoziiert. Primär wird das Temperaturregime der hohen Breiten von der Sonneneinstrahlung gesteuert, die zudem den Wechsel von Polartag und Polarnacht im Jahresgang bestimmt. Darüber hinaus ist die Lufttemperatur der arktischen Küstenregionen von der Nähe zum Ozean beeinflusst, der einen ausgleichenden Einfluss hat. Das äußert sich in kühleren Sommern im Vergleich zum Inland, was auf einer bis zu mehreren hundert Metern mächtigen Inversionsschicht aus kühler, mariner Luft über den Küstenregionen beruht (ATKINSON 2000). Im Vergleich zum Inland sind die Winter in arktischen Küstenregionen wärmer, da das Meereis den Ozean nicht komplett isoliert und somit ein Wärme- und Feuchteausaustausch mit den unteren Schichten der Atmosphäre über offene und zeitweise offene Meereisbereiche (Polynjen) stattfindet. Der Bewölkungsgrad ist ein weiterer wichtiger Faktor für das Temperaturregime an arktischen Küsten, wobei wolkenfreie Perioden im Sommer zu positiven Strahlungsbilanzen führen und das Schmelzen von Eis auf dem Meer und an Land fördern, während starke Bewölkung im Winter den Wärmeverlust an die Atmosphäre mildert.

Die direkten Auswirkungen erhöhter Luft-, Wasser- und Bodentemperaturen auf arktische Küsten und Meere äußern



sich in zunehmender Permafrostdegradation (Abb. 8) und Küstenerosion.



**Abb. 8:** Aktiv erodierender eisreicher Permafrost an der Südküste der Bol'shoy-Lyakhovsky-Insel (Neusibirischer Archipel; Foto: S. Wetterich, Juli 2007).

**Fig. 8:** Actively eroding permafrost exposed at the southern coast of Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago; Photo: S. Wetterich July 2007).

Die Oberflächentemperatur des Meeresbodens bestimmt die für den submarinen Permafrost entscheidenden Temperaturverhältnisse an seiner oberen Grenze.

Wassertemperaturdaten aus 10 m Wassertiefe für den Zeitraum 1950 bis 1989 (ARCTIC CLIMATOLOGY PROJECT 1997, 1998) belegen für die Sommermonate eine leichte Erwärmung insbesondere in der kanadischen Beaufortsee, während in weiten Teilen der sibirischen Schelfgebiete keine Änderungen oder sogar eine leichte Abnahme der Temperatur zu beobachten war (Abb. 9).

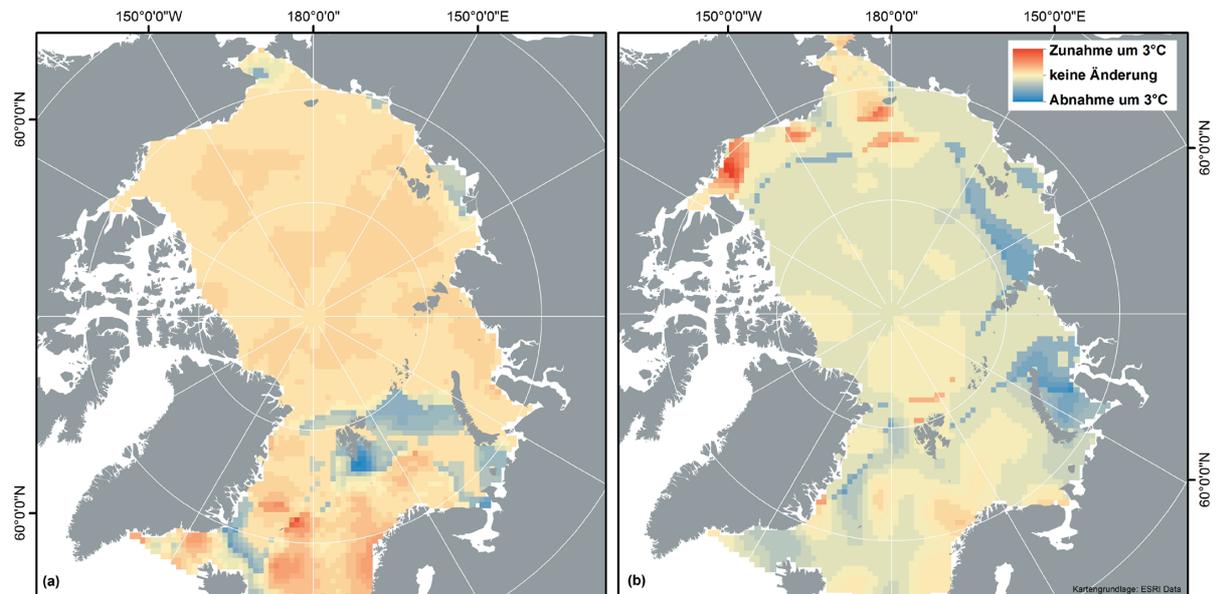
### Extreme Witterungsereignisse

Die sich verändernden meteorologischen und klimatischen Bedingungen in der Arktis manifestieren sich unter anderem in einer Zunahme extremer Witterungsereignisse, die sich regional sehr unterschiedlich auswirken. Stürme sind in diesem Kontext definiert als lokal beobachtete Windgeschwindigkeiten von mehr als  $10 \text{ m sec}^{-1}$ , über eine Dauer von mindestens 6 Stunden. In einer statistischen Auswertung von Sturmereignissen in den küstennahen Regionen der Arktis zwischen 1950 und 2000 (ATKINSON 2005) zeigen sich für die Barentssee und die Norwegische See typische Winter- und Frühjahrsstürme und eher ruhige Sommermonate, wie sie auch in mittleren Breiten typisch sind und von der Nordatlantikdrift beeinflusst sind. In östlicher Richtung (Karasee, Laptevsee und Ostsibirische See) verschieben sich die Sturmmaxima in den Spätsommer und Frühherbst, also in den Zeitraum, in dem das Meer nicht eisbedeckt ist und aufsteigende Verdunstungsfeuchte die Sturmaktivität begünstigt. In den Bereichen der Chukchi- und der Beaufortsee, des Kanadischen Archipels und der Grönlandsee zeigen wiederum die Herbst- und Wintermonate höchste Sturmaktivitäten (ATKINSON 2005).

### Meeresspiegelanstieg

Veränderungen des Meeresspiegels im Arktischen Ozean werden als Summenindikator für Änderungen der ozeanischen Zirkulation, im Wasser-, Meereis- und Sedimenttransport sowie für Küstenerosion angesehen (PROSHUTINSKY & JOHNSON 1997).

Ein steigender Meeresspiegel entlang der arktischen Küsten zeigt sich in einer positiven Rate von  $1,94 \pm 0,47 \text{ mm pro Jahr}$  (unter Berücksichtigung glazio-isostatischer Effekte), basie-



**Abb. 9:** Differenz der Wassertemperaturen in 10 m Wassertiefe zwischen 1950 und 1989 in den Wintermonaten (a) und Sommermonaten (b) (ARCTIC CLIMATOLOGY PROJECT 1997, 1998; Karte: F. Günther, AWI).

**Fig. 9:** Difference in water temperatures at 10 m water depth between 1959 and 1989 in winter (a) and in summer (b) (ARCTIC CLIMATOLOGY PROJECT 1997, 1998; map: F. Günther, AWI).



rend auf Pegelmessungen an 71 Messstationen in Sibirien zwischen 1954 und 1989 (PROSHUTINSKY et al. 2007). Unter Berücksichtigung von 9 Pegelstationen an denen von 1990 bis 2009 Daten erhoben wurden, erhöht sich die Rate insgesamt auf  $2,57 \pm 0,45$  mm pro Jahr (PROSHUTINSKY et al. 2010). Beide Werte liegen oberhalb der Anstiegsrate des globalen Meeresspiegels, die basierend auf Daten der Jahre 1961 bis 2003 mit  $1,6 \pm 0,02$  mm pro Jahr angegeben wird (DOMINGUES et al. 2008). Neuere Untersuchungen (SWIPA 2011) bestimmen den jährlichen Meeresspiegelanstieg im globalen Maßstab mit 3,1 mm für die Jahre 2003 bis 2008, der wesentlich vom Meeresspiegelanstieg im Arktischen Ozean getragen wird.

### Meereisrückgang

Küstenprozesse in der Arktis sind zu großen Teilen durch das Vorhandensein von Meereis kontrolliert, das auf Wellenaktivität und somit die Küstenstabilität wirkt. Die Intensität und Dauer von wind-induzierter Wellenaktivität, die insbesondere Permafrostküsten erodiert, hängt wesentlich von der Lage des Meereisrandes und der vorherrschenden Windrichtung ab.

Über die vergangenen Jahrzehnte wurde eine zunehmende Abnahme der Meereisbedeckung in den Sommermonaten beobachtet, die in drastischen Meereisminima 2002 und 2007 deutlich wurden (COMISO et al. 2008). Im Vergleich zu Modellrechnungen des künftigen Meereisrückgangs übersteigt der bereits eingetretene Verlust das in Modellen für die kommenden Jahrzehnte vorhergesagte Ausmaß (WANG & OVERLAND 2009). Darüber hinaus verringert sich die Meereisdicke (LINDSAY et al. 2009), was eine weitere Abnahme der sommerlichen Meereisbedeckung begünstigt (Abb. 7).

Wellen haben einen großen Einfluss auf den Zustand und Abtrag der arktischen Permafrostküsten. Die Distanz, die der Wind über offenes Wasser zurück legt (*fetch length*), bestimmt Wellenhöhe und Wellenlänge, die neben der Windstärke das erosive Potential von Wellen an der Küste ausmachen. Je länger diese Distanz und stärker der Wind sind, umso größer und stärker sind die Wellen, die auf die Küste treffen. Da arktische Küstengewässer den größten Teil des Jahres von Meereis bedeckt und somit fetch-limitiert sind, bedingt die bereits beschriebene sich zeitlich und räumlich verringernde Meereisbedeckung eine verstärkte Küstenerosion.

### PROGNOSEN FÜR DIE ZUKUNFT

Die Stabilität von küstennahem und submarinem Permafrost in der Arktis hängt direkt vom Ausmaß der Veränderungen von Temperatur und Salzgehalt des Meerwassers, von der Meereisdicke und -bedeckung sowie der Beschaffenheit der Küstenmorphologie ab. Allgemein lassen sich aus den heute zur Verfügung stehenden Daten zur Dynamik der arktischen Küsten und des submarinen Permafrostes folgende Projektionen über künftige Entwicklungen unter sich verändernden Klimabedingungen ableiten:

(1) Der vorhergesagte Anstieg der Lufttemperatur kann zu stärkerem oberflächlichem Auftauen von Landpermafrost führen. Dadurch erhöht sich der Stoffeintrag vom Land ins Meer, was sich in höheren Abflussraten der Flüsse widerspiegelt.

Letztere transportieren somit zunehmend relativ warmes Wasser und mehr Material ins Meer wodurch wiederum die Meerwassertemperatur und der Salzgehalt beeinflusst werden. Weiterhin führen erhöhte Lufttemperaturen zu einer zunehmenden Destabilisierung von Küstenpermafrost in den Sommermonaten, wodurch die Küstenerosion verstärkt wird.

(2) Durch die zeitlich und räumlich abnehmende Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans, erhöht sich die mittlere Temperatur der küstennahen Gewässer. Der mittlere Meeresspiegel erhöht sich durch verlängerte Windlaufzeiten. Beide Faktoren führen zu höheren Erosionsraten an eisreichen Permafrostküsten.

(3) Abnehmende Meereisdicke und -bedeckung im küstennahen Bereich verringern die Bildung von extrem salzigem Bodenwasser. Dadurch wäre ein wesentlicher Parameter für die Degradation von submarinem Permafrost eingeschränkt. Der gleichzeitig zu erwartende Anstieg der Temperaturen des Schelfwassers würde hingegen zu einer stärkeren Erwärmung der marinen Sedimente führen.

(4) Ein Ansteigen des Meeresspiegels zusammen mit zeitlich und räumlich abnehmender Meereisbedeckung lassen eine zunehmende Destabilisierung der arktischen Festlandsküsten – insbesondere der weit verbreiteten Permafrostküsten – und verstärkte Küstenerosion annehmen. Festgesteinsküsten in der Arktis sind davon ausgenommen.

### KÜNFTIGE FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Die derzeitige Untersuchung arktischer Küsten und des vorgelegerten submarinen Permafrostes beschränkt sich auf relativ wenige und räumlich nicht repräsentativ verteilte Standorte, wenn man die enorme räumliche Dimension des Forschungsgegenstandes in Betracht zieht. Eine kontinuierliche Datenerfassung der zeitlich sehr variablen Küstenprozesse in der Arktis ist deshalb von höchster Bedeutung, insbesondere, wenn der Zusammenhang zwischen marinen, terrestrischen und atmosphärischen Systemen dokumentiert und verstanden werden soll. Eine höhere Beobachtungsdichte ist sowohl in zeitlicher, wie auch räumlicher Dimension anzustreben, um eine bessere Datenbasis für zirkumarktische Aussagen zu erreichen. Der Kombination von vor-Ort-Messungen mit Fernerkundungsdaten kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Die Nutzung moderner Satellitendaten in Verbindung mit detaillierten topographischen Vermessungen in ausgewählten Schlüsselregionen wird derzeit am AWI Potsdam entwickelt und auf größere Bereiche der sibirischen Permafrostküsten angewendet.

Die Auswertung von historischen Datensätzen der letzten Jahrzehnte zu küstendynamischen Prozessen erlaubt darüber hinaus Aussagen über Küstenveränderungen im dekadischen Zeitmaßstab.

Eine allgemein verbindliche Vereinbarung, wie Daten zur Küstendynamik in der Arktis erhoben, ausgewertet und interpretiert werden, existiert bisher nicht. Eines der Ziele des internationalen *Arctic Coastal Dynamics Project* (ACD) ist es jedoch die Vergleichbarkeit solcher Datensätze durch standardisierte Analysemethoden zu verbessern (LANTUIT et al.

2011b).

Um die Dynamik der Permafrostküsten besser zu verstehen, ist ein Netzwerk koordinierter und standardisierter Untersuchungen im zirkumparktischen Maßstab erforderlich, insbesondere im Hinblick auf Verlauf und Geschwindigkeit der Küstenveränderung und ihre Steuerung durch Umweltprozesse.

Zukünftige quantitative Berechnungen betreffen:

- die Zusammenhänge zwischen Grundeisvolumen und Erosionsraten,
- den von Permafrostküsten stammenden Sedimenteintrag in die Meere,
- die gesamte Oberflächenmassenbilanz,
- die Kohlenstofffreisetzung,
- die Veränderungen des Reliefs der periglazialen Landoberflächen und des Meeresbodens.

Oberflächen- und Gewässerparameter werden zukünftig aus Fernerkundungsdaten abgeleitet und Massenbilanzen zunehmend aus detaillierten satellitenbasierten digitalen Geländemodellen errechnet.

Die Verbreitung, der Aufbau und die spezifischen Eigenschaften des submarinen Permafrostes sollten durch den kombinierten Einsatz von Bohrungen und umfangreicher geophysikalischer Erkundungen in den Schelf- und Küstengebieten erfasst werden. Auf diesem Wege werden die Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von submarinem Permafrost, möglichen Gasvorkommen darin und darunter und den entsprechenden Gasmigrationswegen erkundet. Dies sind Grundlagen für die Abschätzung wie viel Gashydrat im submarinen Permafrost zu erwarten ist und wie viel davon im Zuge von Permafrostdegradation freigesetzt werden könnte.

## DANKSAGUNG

Der Dank der Autoren gilt in erster Linie den russischen und deutschen Kollegen, die uns seit vielen Jahren bei der Erforschung der arktischen Küsten und des küstennahen Permafrosts unterstützen. Exemplarisch seien Mikhail Grigoriev, Viktor Kunitsky (beide RAS SB Permafrostinstitut Yakutsk), Dmitry Bol'shiyanov (AARI St. Petersburg), Waldemar Schneider und Hans-Wolfgang Hubberten (beide AWI Potsdam) genannt. Darüber hinaus profitiert der vorliegende Aufsatz wesentlich von zahlreichen Diskussionen mit Lutz Schirrmeister (AWI Potsdam) und den kritisch-konstruktiven Kommentaren zweier Gutachter – Volker Rachold (IASC) und Anonymus – beiden sei herzlich für die Durchsicht des Manuskriptes gedankt. Abb. 8 wurde dankenswerterweise von Frank Günther (AWI Potsdam) zur Verfügung gestellt.

### Literatur

ACD: Arctic Coastal Dynamics Project <http://acd.arcticportal.org>

ACIA (2005): Arctic Climate Impacts Assessment, Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Arctic Climatology Project (1997): Environmental Working Group Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean – Winter Period. L. Timokhov & F. Tanis (eds), Environmental Research Institute of Michigan & National Snow and Ice Data Center, Ann Arbor, Michigan.

Arctic Climatology Project (1998): Environmental Working Group Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean – Summer Period. L. Timokhov & F. Tanis (eds), Environmental Research Institute of Michigan & National Snow and Ice Data Center, Ann Arbor, Michigan.

Are, F., Reimnitz, E., Grigoriev, M., Hubberten, H.-W. & Rachold, V. (2008): The influence of cryogenic processes on the erosional Arctic shoreface.- J. Coastal Res. 24: 110-121.

Arp, C.D., Jones, B.M., Schmutz, J.A., Urban, F.E., & Jorgenson, M.T. (2010): Two mechanisms of aquatic and terrestrial habitat change along an Alaskan Arctic coastline.- Polar Biology 33: 1629-1640.

Atkinson, D.E. (2000): Modelling July mean temperatures on the Fosheim Peninsula, Ellesmere Island.- Geol. Surv. Canada Bull. 529: 99-111.

Atkinson, D. (2005): Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime.- Geo-Mar. Lett. 25: 98-109.

Bauch, H.A., Mueller-Lupp, T., Taldenkova, E., Spielhagen, R.F., Kassens, H., Grootes, P.M., Thiede, J., Heinemeier, J. & Petryashov, V.V. (2001): Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin.- Global Planet. Change 31: 125-139.

Brown, J., Ferrians, Jr. O.J., Heginbottom, J.A. & Melnikov, E.S. (1998, revised 2001): Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Conditions. US Geological-ice Survey Series, CP-45. Reston, VA, USA.

Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Gersten, R. & Stock, L. (2008): Accelerated decline in the Arctic sea ice cover.- Geophys. Res. Lett. 35: L01703.

Domingues, C.M., Church, J.A., White, N.J., Gleckler, P.J., Wijffels, S.E., Barker, P.M. & Dunn, J.R. (2008): Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise.- Nature 453: 1090-1093.

Forbes, D.L. (ed) (2011): State of the Arctic Coast 2010 - Scientific Review and Outlook.- IASC, LOICZ, AMAP, IPA, HZG, Geestacht, 1-168 (online verfügbar unter: [www.arcticcoasts.org](http://www.arcticcoasts.org)).

Gosink J.P. & Baker G.C. (1990): Salt Fingering in Subsea Permafrost: Some Stability and Energy Considerations.- J. Geophys. Res. 95: 9575-9583.

Grigoriev, M.N. (2006): Morphology and dynamics of submarine permafrost transition in the coastal shelf of the Laptev and East Siberian Seas.- Sci. Education 4: 104-109. (Orig. Russ.: Morfologiya i dinamika preobrazovaniya podvodnoi merzloty v pribrezhno-shelfovoi zone morei Laptevyykh i Vostochno-Sibirskogo. Nauka i Obrazovanie 4)

Hubberten, H.-W. & Romanovskii, N.N. (2000): Onshore and off-shore permafrost of the Laptev Sea region during the last Pleistocene-Holocene glacial-eustatic cycle.- Polarforschung 68: 227-230.

Jones, B., Arp, C., Jorgenson, M., Hinkel, K., Schmutz, J. & Flint, P. (2009): Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska.- Geophys. Res. Letters 36: L03503.

Kassens, H., Bauch, H.A., Dmitrenko, I.A., Eicken, H., Hubberten, H.-W., Melles, M., Thiede, J., Timokhov, L.A. (eds) (1999): Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History.- Springer-Verlag, Berlin, 1-711.

Kvenvolden, K.A. (1995): A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate.- Organic Geochem. 23: 997-1008.

Lantuit, H. & Pollard, W.H. (2005): Temporal stereophotogrammetric analysis of retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory.- Natur. Hazards Earth Syst. Sci. 5: 413-423.

Lantuit, H. & Pollard, W.H. (2008): Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada.- Geomorphol. 95(1/2): 84-102.

Lantuit, H., Atkinson, D., Grigoriev, M., Rachold, V., Grosse, G. & Hubberten, H.-W. (2011a): Coastal erosion dynamics on the permafrost-dominated Bykovsky Peninsula, North Siberia, 1951-2006.- Polar Res. 30: 7341.

Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D., Brown, J., Cherkashov, G., Drozdov, D., Forbes, D., Graves-Gaylord, A., Grigoriev, M.N., Hubberten, H.-W., Jordan, J., Jorgenson, T., Ødegård, R.S., Ogorodov, S., Pollard, W.H., Rachold, V., Sedenko, S., Solomon, S., Steenhuisen, F., Streletskaia, I. & Vasiliev, A. (2011b): The Arctic Coastal Dynamics database: A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines. Estuaries and Coasts: doi:10.1007/s12237-010-9362-6.

Leifer, L., Lyuyendyk, B.P., Boles, J. & Clark, J.F. (2006): Natural marine seepage blowout: Contribution to atmospheric methane.- Global Biogeochem. Cycl. 20: GB3008.

Lindsay, R.W., Zhang, J., Schweiger, A., Steele, M. & Stern, H. (2009): Arctic sea ice retreat in 2007 follows thinning trend.- J. Climate 22: 165-176.

Maslin, M., Owen, M., Betts, R., Day, S., Jones, T.D. & Ridgwell, A. (2010): Gas hydrates: past and future geohazard? - Philosoph. Transact. Royal Soc. A 368: 2369-2393 doi:10.1098/rsta.2010.0065.

McGuire, A.D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann, M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W. & Roulet, N. (2009): Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change.- Ecol. Monogr. 79(4): 523-555.

O'Connor, F.M., Boucher, O., Gedney, N., Jones, C.D., Folberth, G.A., Coppel, R., Friedlingstein, P., Collins, W.J., Chappallaz, J., Ridley, J. & Johnson, C.E. (2010): Possible role of wetlands, permafrost, and methane

- hydrates in the methane cycle under future climate change: A review.- *Rev. Geophys.* 48: RG4005.
- Osterkamp, T.E.* (2001): Sub-sea permafrost. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press, New York, 2902-2912.
- Overduin, P.P., Hubberten, H.-W., Rachold, V., Romanovskii, N., Grigoriev, M.N. & Kasymkaya, M.* (2007): Evolution and degradation of coastal and offshore permafrost in the Laptev and East Siberian Seas during the last climatic cycle.- *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* 426: 97-111.
- Overduin, P.P., Solomon, S.M., Atkinson, D., Dallimore, S., Eicken, H., Forbes, D.L., Grigoriev, M., Holmes, R.M., James, T.S., Manson, G.K., McClelland, J.W., Mueller, D., Ødegård, R., Ogorodov, S., Proshutinsky, A. & Weterich, S.* (2011): Chapter 2.1 Physical state of the circum-arctic coast.- In: D.L. FORBES (ed), *State of the Arctic Coast 2010 - Scientific Review and Outlook*. IASC, LOICZ, AMAP, IPA, HZG, Geesthacht, 11-39 (online: [www.arcticcoasts.org](http://www.arcticcoasts.org)).
- Ping, C.-L., Michaelson, G.J., Guo, L., Jorgenson, M.T., Kanevskiy, M., Shur, Y., Dou, F. & Liang, J.* (2011): Soil carbon and material fluxes across the eroding Alaska Beaufort Sea coastline.- *J. Geophys. Res.* 116: G02004.
- Proshutinsky, A. & Johnson, M.* (1997): Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean.- *J. Geophys. Res.* 102: 12493-12514.
- Proshutinsky, A., Ashik, I., Häkkinen, S., Hunke, E., Krishfield, R., Maltrud, M., Maslowski, W. & Zhang, J.* (2007): Sea level variability in the Arctic Ocean from AOMIP models.- *J. Geophys. Res.* 112: C04S08.
- Proshutinsky, A., Solomon, S. & Ashik, I.* (2010): Arctic Ocean storm surges: origin, climatology, impacts, simulations and predictions.- Storm Surges Congress, 13-17 September 2010, Hamburg, Germany: Abstract \_ SSC2010-14.
- Rachold, V., Bolshiyarov, D. Yu., 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 Transact. Amer. Geophys. Union* 88(13): 149-156.
- Rekant, P., Cherkashev, G., Vanstein, B. & Krinitzky, P.* (2005): Submarine permafrost in the nearshore zone of the southwestern Kara Sea.- *Geo-Mar. Lett.* 25: 183-189.
- Rekant, P.V., Tumskoy, V.E., Gusev, E.A., Schwenk, T., Spiess, F., Cherkashev, G.A. & Kassens, H.* (2009): Distribution and peculiarity of bedding of sub-sea permafrost near Semenovskoe and Vasil'evskoe shoals (Laptev Sea) revealed by high resolution seismic profiling.- In: H. KASSENS et al. (eds), *System of the Laptev Sea and the adjacent arctic seas*. Moscow University Press, Moscow, 332-348. (Orig. Russ.).
- Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W., Gavrilov, A.V., Tipenko, G.S., Grigoriev, M.N. & Siegert, Ch.* (2000): Thermokarst and Land-Ocean Interactions, Laptev Sea Region, Russia.- *Permafrost and Periglac. Proc.* 11: 137-152.
- 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-Mar. Lett.* 25(2/3): 167-182.
- Romanovskii, N.N. & Hubberten, H.-W.* (2001): Results of permafrost modeling of the Lowlands and shelf of the Laptev Sea region, Russia.- *Permafrost. Periglac. Process.* 12: 191-202.
- Shakhova, N. & Semiletov, I.* (2009): Methane hydrate feedbacks.- In: M. SOMMERKORN & S.J. HASSOL (eds), *Arctic Climate Feedbacks: Global Implications*. WWF International Arctic Programme, Oslo, 81-92.
- Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D. & Gustafsson, Ö.* (2010a): Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf.- *Science* 327: 1246-1250.
- Shakhova, N., Semiletov, I., Leifer, I., Salyuk, A., Rekant, P. & Kosmach, D.* (2010b): Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf.- *J. Geophys. Res.* 115: C08007.
- Solomon, S.M.* (2005): Spatial and temporal variability of shoreline change in the Beaufort-Mackenzie region, northwest territories, Canada.- *Geo-Mar. Lett.* 25 (2-3): 127-137.
- SWIPA* (2011): Executive summary of the 2011 SWIPA Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic Assessment.- AMAP Secretariat (Arctic Monitoring and Assessment Program), Oslo, Norway, 1-15, (online: [www.amap.no/swipa/](http://www.amap.no/swipa/)).
- van Everdingen, R.* (ed) (1998 revised May 2005): Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.
- Vasiliev, A., Kanevskiy, M., Cherkashov, G. & Vanshtein, B.* (2005): Coastal dynamics at the Barents and Kara Sea key sites.- *Geo-Mar. Lett.* 25(2-3): 110-120.
- Wang, M. & Overland, J.E.* (2009): A sea ice free summer Arctic within 30 years?- *Geophys. Res. Lett.* 36: L07502 (doi:10.1029/2009GL037820).
- Weterich, S., Overduin, P.P. & Fedorova, I.* (eds) (2010): Proceedings of the joint Russian-German workshop on research in the Laptev Sea region.- *Rep. Polar Mar. Res.* 623: 1-78.
- Winterfeld, M., Schirmermeister, L., Grigoriev, M.N., Kunitzky, 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.