

*Polarforschung 81 (1), 3 – 10, 2011 (erschienen 2012)*

## Permafrost ein sensibles Klimaphänomen – Begriffe, Klassifikationen und Zusammenhänge

von Lutz Schirrmeister<sup>1</sup>, Christine Siegert<sup>1</sup> und Jens Strauß<sup>1</sup>

**Kurzfassung:** In einer kurzen Darstellung werden wichtige Begriffe und Zusammenhänge der Permafrostforschung aufgeführt. Dabei wird sowohl auf grundlegende Klassifikationen als auch regionale Verbreitungen und typische Phänomene des Permafrostes eingegangen. Weiterhin wird die Rolle des Permafrostes in der heutigen Umwelt, insbesondere seine Klimasensibilität und Bedeutung für den globalen Kohlenstoffkreislauf, beleuchtet. Abschließend werden wichtige wissenschaftliche Organisationen und Einrichtungen der internationalen Permafrostforschung vorgestellt.

**Abstract:** Important terms and relationships of permafrost research are introduced in a short review. Fundamental classifications as well as regional distributions and typical phenomena of permafrost are described and explained. The role of permafrost in the modern environment, especially its climate sensibility and the relevance for the global carbon cycle are highlighted. Finally, important science organisations and institutions of the international permafrost research are presented.

### PERMAFROST – VERBREITUNG, KLASSIFIKATION UND GEOMORPHOLOGISCHE INDIKATOREN

Permafrost ist ein Klimaphänomen, das aufgrund extremer Winterkälte und geringer Schneehöhe mit einer langfristigen negativen jährlichen Energiebilanz im Boden verbunden ist. Die sommerliche Erwärmung des Bodens reicht nicht aus, um die Frostwirkung vollständig aufzuheben. Nach der Tiefe wird die dauerhafte Gefronnis durch den geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren begrenzt. Da die Existenz von Permafrost an extrem kalte Klimabedingungen gebunden ist, reagieren Permafrostregionen empfindlich auf Klimaänderungen. Entsprechend der Köppen-Geiger-Klimaklassifikation (KÖPPEN 1931, KÖPPEN & GEIGER 1954) tritt Permafrost vor allem unter Tundrenklima (ET) und wintertrocken-kaltem Klima (Dw) auf.

Als Permafrost wird nach VAN EVERDINGEN (1998) sämtlicher Untergrund bezeichnet, der in zwei aufeinander folgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von 0 °C und tiefer aufweist. Damit unterscheidet sich Permafrost von nur saisonal gefrorenem Untergrund. Im Sinne dieser Definition sind ca. 22,8 Millionen km<sup>2</sup> und damit 24 % des Festlandes von Permafrost unterlagert (ZHANG 1999, 2003). Hauptverbreitungsgebiete des Permafrostes sind die zirkumarktischen polaren und subpolaren Festlandsgebiete (SACHS et al. 2011, dieses Heft) und Inseln Eurasiens und Nordamerikas (Abb. 1). Aufgrund des hochkontinentalen Klimas und des sich regel-

mäßig im Winter über weiten Teilen Ostsibiriens ausbildenden stabilen Hochdruckgebietes mit extremer Kälte erstreckt sich hier der Permafrost bis 50 °N und damit zirkumarktisch wesentlich weiter nach Süden als in den anderen Regionen in Europa und Nordamerika.

Die an die arktischen Festlandsgebiete angrenzenden Flachmeere sind ebenfalls von Permafrost unterlagert (submariner Permafrost, siehe WETTERICH & OVERDUIN 2012, dieses Heft). In zahlreichen Hochgebirgen tritt Permafrost je nach Hanglage ab 2500 bis 3000 m über NN auf (KRAUTBLATTER & HAUCK 2012, dieses Heft) und bildet im Hochland von Tibet ein weiteres geschlossenes Verbreitungsgebiet. Zudem tritt Permafrost auch in den unvergletscherten Gebieten der Antarktis auf (SCHWAMBORN et al. 2012, dieses Heft).

Neben der Klassifikation in terrestrischen, submarinen und Gebirgspermafrost wird die terrestrische Permafrostregion nach der Geschlossenheit der Permafrostdecke in kontinuierlichen, diskontinuierlichen, sporadischen und inselartigen Permafrost unterschieden (Abb. 2).

Die Mächtigkeit der Permafrostzone reicht von wenigen Dekametern bis zu ca. 1500 m. Die Mächtigkeit und das Wachstum von Permafrost widerspiegeln eine negative Wärmebilanz zwischen Untergrund- und Oberflächentemperatur. Diese wird regional von oben her durch die Lufttemperatur und von unten durch den geothermischen Gradienten gesteuert (FRENCH 2007). So finden sich die größte Permafrostmächtigkeiten von >1000 m über dem kristallinen Anabar-Massiv und seinen Flanken in Sibirien (Abb. 3). Wie durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen werden konnte, ist der sehr geringe Wärmefluss aus dem Erdinneren hier der bestimmende Faktor für die Ausbildung dieser hohen Permafrostmächtigkeit (BALOBAEV 1991).

Vertikal gliedert sich der Untergrund in Permafrostgebieten in eine obere saisonale Auftauzone, eine Übergangzone mit negativen aber im Jahresgang schwankenden Temperaturen sowie die Dauerfrostzone i.e.S., in der die negativen Temperaturen stabil bleiben (Abb. 4a). Innerhalb der Permafrostzone auftretende ungefrorene Bereiche werden als Talik (Abb. 4b) bezeichnet. Sie treten häufig unterhalb von Wärme speichernden Wasserkörpern wie Seen oder Flüssen auf (Suprapermafrosttalik), können aber auch als nach allen Seiten geschlossenen Linsen (Intrapermafrosttalik) mit salzhaltigen Porenwässern (Kryopegen) verbunden sein. Hinsichtlich der Mächtigkeit der saisonalen Auftauzone gibt es ebenfalls einen Nord-Süd-Gradienten, der von wenigen Dezimetern in der sibirischen Arktis bis mehr als 2 m in Zentraljakutien und den Permafrostgebieten Transbaikaliens reicht (Abb. 2).

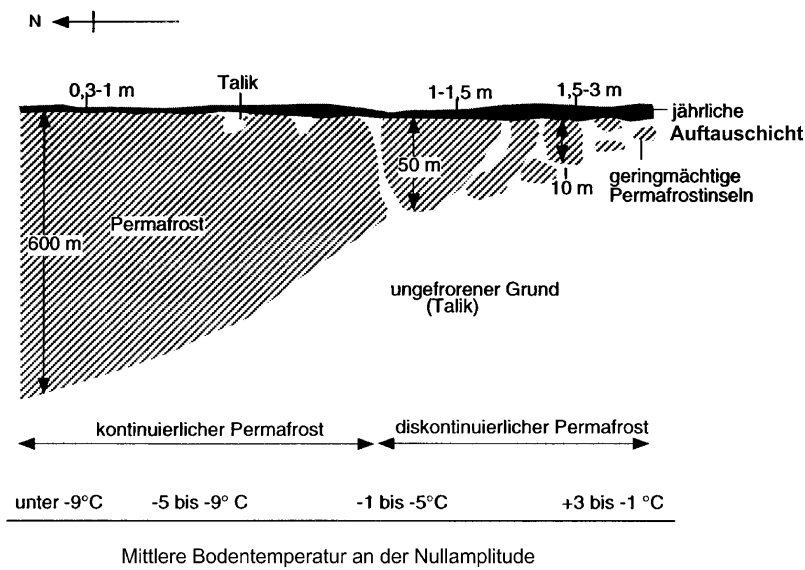
<sup>1</sup> Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Forschungsstelle Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam; <lutz.schirrmeister@awi.de>, <christine.siegert@awi.de>, <jens.strauss@awi.de>

Manuskript eingereicht am 26. Mai 2011; überarbeitet zum Druck angenommen am 06. Oktober 2011



**Abb. 1:** Karte der Permafrostverbreitung in der Nordhemisphäre (nach BROWN et al. 1997) und der Messstandorte im zirkumarktischen Permafrostnetzwerk GTN-P. ROMANOVSKY et al. (2010)

**Fig. 1:** Map of the Permafrost distribution in the northern hemisphere (according to BROWN et al. 1997) and of the measuring sites of the circumarctic permafrost network GTN-P. ROMANOVSKY et al. (2010)



**Abb. 2:** Schematischer Querschnitt durch den ostsibirischen Permafrost nach WASHBURN (1979).

**Fig. 2:** Schematic cross section trough the East Siberian Permafrost zone after WASHBURN (1979).

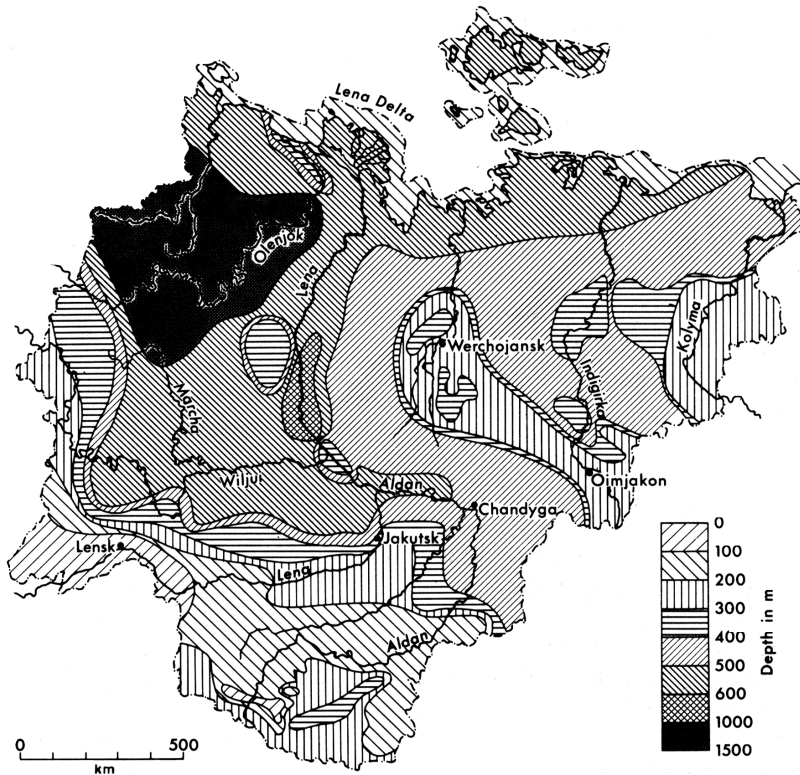


Abb. 3: Permafrostmächtigkeiten in Jakutien (nach EMBLETON & KING 1975, aus WEISE 1983).

Fig. 3: Permafrost thicknesses in Yakutia (after EMBLETON & KING 1975, from WEISE 1983).

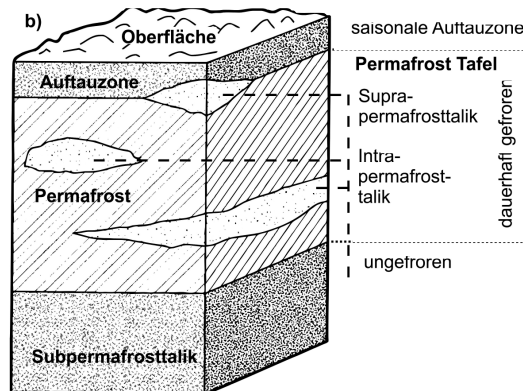
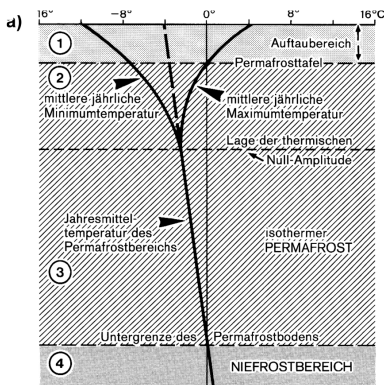


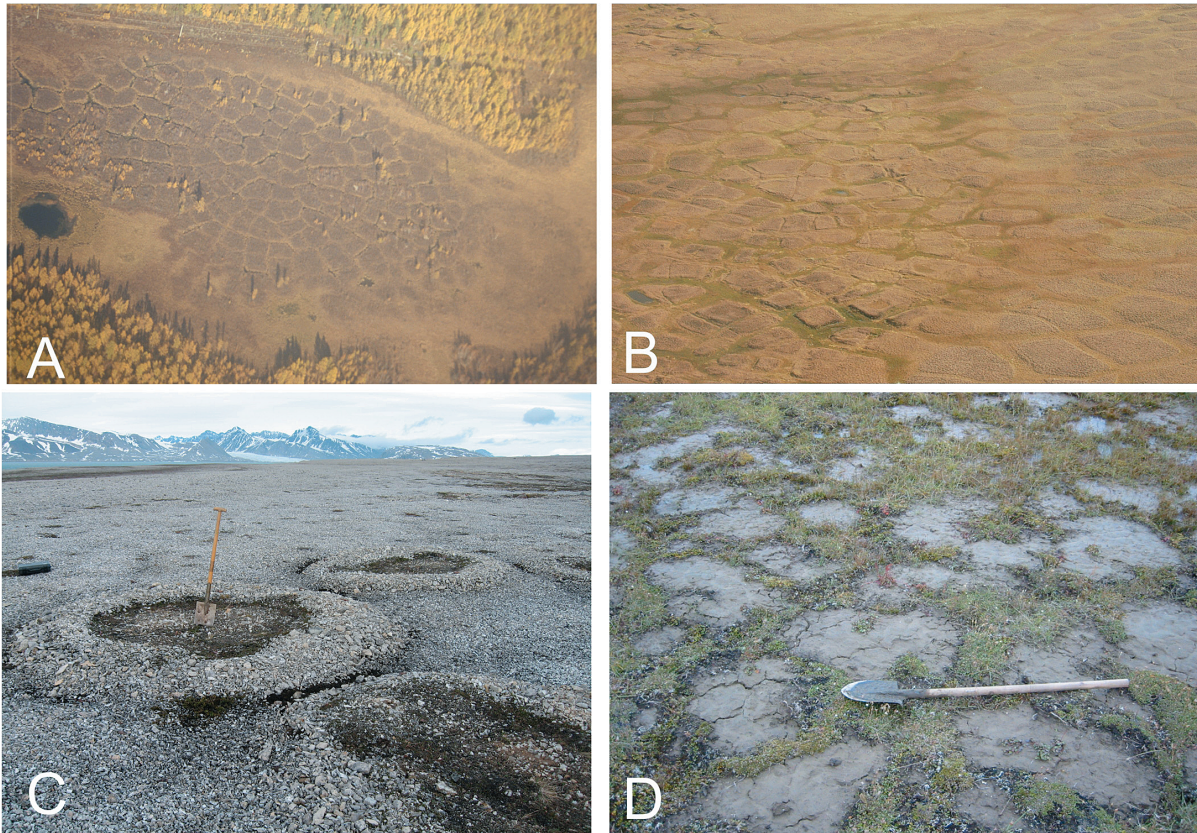
Abb 4: Vertikale Gliederung der Permafrostzone in Bezug zu den a) Temperaturbedingungen (nach WEISE 1983) und b) hydrologischen Verhältnissen (nach FRENCH 2007).

Fig. 4: Vertical structure of the permafrost zone in relation to a) temperature conditions (after WEISE 1983) and b) hydrological circumstances (after FRENCH 2007).

Zahlreiche geomorphologische Indikatoren lassen die Existenz von Permafrost, aber auch seinen Abbau (Degradation) durch natürliche Prozesse sowie durch menschlichen Einfluss deutlich werden. Häufige an der Oberfläche sichtbare Indikatoren für Frostwirkungen in Tieflandsregionen sind z.B. Frostmusterböden, die in Form von polygonalen Eiskeilsystemen, sortierten Steinringen oder Frostbeulen auftreten (Abb. 5). Solche Muster entstehen durch thermisch bedingte Kontraktion des gefrorenen Bodens, durch Frosthebungsprozesse bzw. durch die unterschiedliche Eisverteilung im Untergrund. An Hängen bilden sich durch die Bewegung der Auftauzone auf dem gefrorenen Untergrund charakteristische Strukturen wie z.B. nicht sortierte Feinerdestreifen und unterschiedliche Solifluktuonsstrukturen (Abb. 6) wie Solifluktuons-Loben, -Decken und -Terrassen. Sie können auch im

Zusammenhang mit nur saisonaler Frostwirkung auftreten, sind aber vor allem in Dauerfrostgebieten weit verbreitet. Zu typischen Reliefformen in Permafrostgebieten zählen Pingos (Abb. 6A). Dabei handelt es sich um mehr als 10 m hohe Eiskernhügel mit einem Durchmesser von ca. 100 m und mehr, die durch die Injektion von Wasser in den Permafrost entstehen. Sie treten in großer Zahl auf (GROSSE & JONES 2011) und entstehen im Zuge des erneuten Gefrierens von bereits getautem Permafrost.

Die wichtigsten Umweltfaktoren, welche die lokalen Permafrostbedingungen steuern, sind Oberflächenrelief, Schneedecke, Vegetation, das oberflächennahe Material und die Feuchtigkeit des Untergrundes (FRENCH 2007, WASHBURN 1979).



**Abb 5:** Frostmusterböden aus arktischen und subarktischen Permafrostgebieten. A = Drainierter Thermokarstsee mit Eiskeilpolygonnetz in Zentraljakutien (Foto: L. Schirrmeister 2001); B = Eiskeilpolygone im Küstentiefland der Lapteewsee, Nordjakutien (Foto: F. Kienast 2007); C = Steinringe auf der Brøggerhalbinsel, Spitzbergen (Foto: M. Ulrich 2009); D = Frostbeulen (mud boils) im Khorogortal bei Tiksi, Lapteewsee (Foto: G. Grosse 2002).

**Fig. 5:** Patterned ground in permafrost regions. A = Drained thermokarst lake with polygonal patterned ground, Central Yakutia, Photo L. Schirrmeister 2001; B = Ice wedge polygons on a river loop of the Yana Delta, North Yakutia, Photo O. H. Meyer 1999; C = Stone circles at Brøgger Peninsula (Svalbard) (Photo: M. Ulrich 2009); D = Frost boils (mud boils) in the Khorogor Valley near Tiksi, Laptev Sea (Photo: G. Grosse 2002).

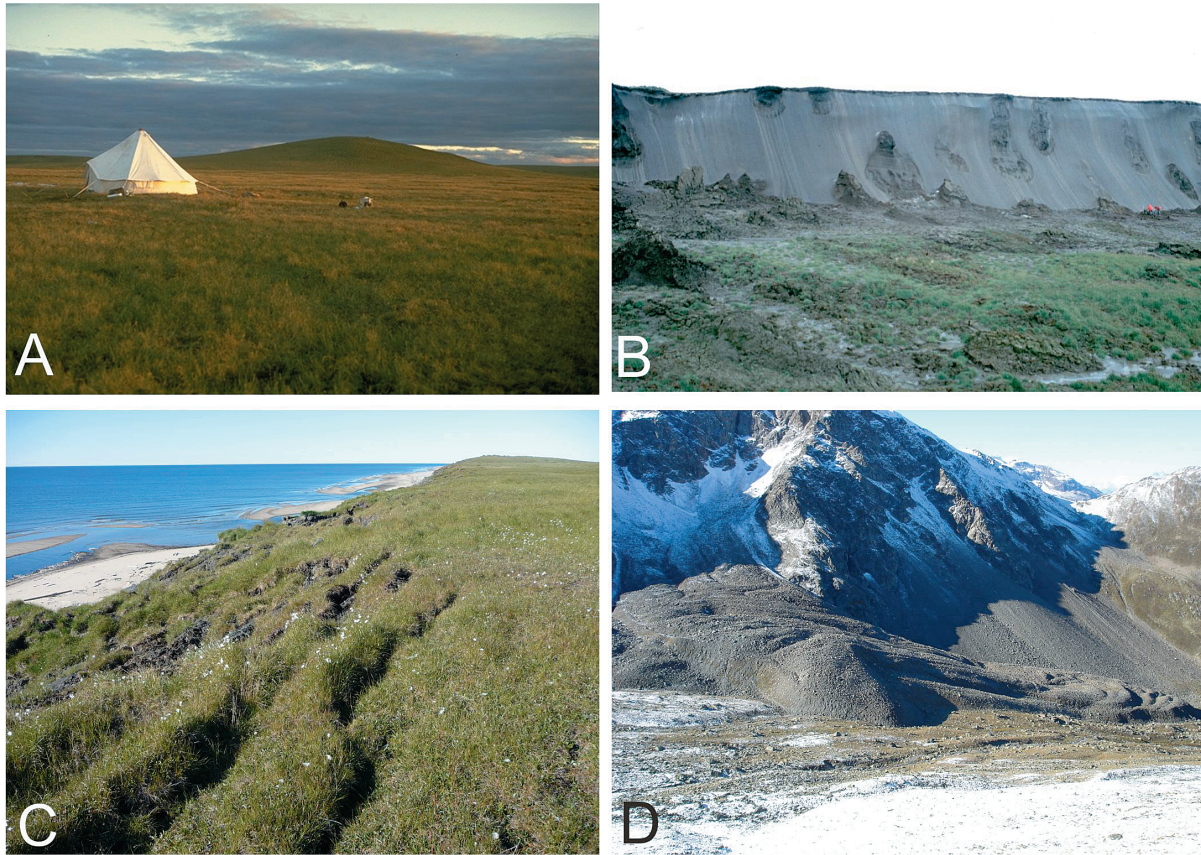
Die Permafrostgebiete sind aufgrund der extremen kalt-trockenen Klimabedingungen und der besonderen thermischen sowie hydrologischen Bedingungen der häufig nährstoffarmen, stark durchnässten saisonalen Auftauschicht mit flachgründiger Durchwurzelung durch spezielle Vegetationszonen gekennzeichnet. Sie weisen hinsichtlich der Vegetationsverteilung einen Nord-Süd-Gradienten auf. Während im Norden die arktische Wüste und Tundra mit Gräsern und Zwergsträuchern dominieren, schließen sich nach Süden hin Gebiete der Baumtundra und borealen Taiga an, in der kälteresistente Birken und Lärchen dominieren (VENZKE 1998). Neben diesen regionalen Gradienten können die Böden in Bezug auf Feuchte und Nährstoffgehalt durch die oberflächennahe Lage der Permafrostgrenze kleinräumig sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. In der borealen Taiga treten z.B. neben Birken und Lärchen auch Erlen und in geschützten Lagen wie Flusstälern und an Hängen von Seesenken sogar Fichten auf. In innerkontinentalen, extrem ariden Permafrostgebieten sind Areale von Kältesteppen, die als Relikte der letzten Eiszeit angesehen werden können, verbreitet.

Veränderungen in den thermischen und hydrologischen Eigenschaften der Permafrostlandschaften haben einen direkten

Einfluss auf die jeweiligen Vegetationsgemeinschaften. Umgekehrt wirkt die Vegetationsdecke (z.B. Moospolster) isolierend und damit stabilisierend auf das Temperaturregime des gefrorenen Untergrundes und verringert die Tiefe der Auftauzone.

#### PERMAFROST IN DER HEUTIGEN UMWELT

Die dauerhaft negativen Temperaturen im Permafrost, das massive Auftreten von Grundeis, die bis knapp unter die Erdoberfläche reichende gefrorene Zone und die zur Stabilität des Permafrostes erforderliche negative Energiebilanz bedingen ein komplexes Wirkungsgefüge. Dessen natürliche oder anthropogen bedingten klein- oder großräumigen Störungen haben lokal direkte und indirekte Auswirkungen auf den gefrorenen Untergrund. Über Wechselwirkungs- und Rückkopplungsmechanismen reichen die Auswirkungen regional und global weit darüber hinaus. Natürliche Störungen des klimaabhängigen Permafrostsystems haben während der Wechsel von Kalt- und Warmzeiten im Quartär wiederholt stattgefunden mit zum Teil drastischen Folgen für Flora, Fauna und periglaziale Landschaften. Diese Variationen sind in gefrorenen Sedimentabfolgen anhand fossiler Reste und



**Abb 6:** Periglaziale Relief- und Oberflächenstrukturen. A = Pingo in einer verlandeten Thermokarstsenke (Alas) auf der Halbinsel Bykovsky, Laptewsee (Foto: L. Schirmeister 1998); B = Eisreiche Permafrostfolge (Yedoma) an der Dmitry Laptev Straße (Foto: G. Grosse 1999); C = Solifluktuionsformen an der Küste der Halbinsel Buor Khaya, Laptewsee (Foto: F. Günther 2010); D = Muragl-Blockgletscher, Engadin, Schweizer Alpen (Foto: C. Kneisel, Würzburg).

**Fig. 6:** Periglacial relief and surface structures. A = pingo within a desiccating thermokarst depression (alas) at Bykovsky Peninsula, Laptev Sea (Photo: L. Schirmeister 1998); B = ice-rich permafrost sequence (Yedoma) at the Dmitry Laptev Strait (Photo: G. Grosse 1999); C = solifluction structures at the coast of the Buor Khaya Peninsula, Laptev Sea (Photo: F. Günther 2010); D = Muragl rock glacier, Upper Engadin, Swiss Alps (Photo: C. Kneisel, Würzburg).

charakteristischer Eis- und Sedimentstrukturen rekonstruierbar. Die jüngsten Spuren der natürlich bedingten Störungen des thermischen Gleichgewichts führten zur Entstehung der weit verbreiteten Thermokarstlandschaften im Norden Sibiriens und Nordamerikas, deren zahllose Seesenken eine Folge der Permafrostdegradation im Zuge der globalen Erwärmung nach der letzten Eiszeit sind.

Neben den direkten Auswirkungen der Permafrostdynamik auf die arktische Landschaft und Lebenswelt spielt der in den gefrorenen Sedimenten gespeicherte organische Kohlenstoff eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf (SCHUUR et al. 2009). Die abgestorbene Vegetation der Wald- und Tundragebiete wird zunächst im Bereich der Auftauzone akkumuliert und bei zunehmender Mächtigkeit der Ablagerung allmählich in den dauerhaft gefrorenen Bereich integriert. Da die negativen Temperaturen den Abbau des organischen Kohlenstoffs weitgehend verhindern, wurden so im Quartär große Mengen an organischem Kohlenstoff akkumuliert und die Permafrostgebiete wirkten daher als eine große Kohlenstoffsenke (POST et al. 1982). Neuere Schätzungen gehen von einer Menge von bis zu 1672 Gt Kohlenstoff aus (TARNOCAI et

al. 2009), was etwa dem 2,5fachen der in der globalen Vegetation gespeicherten Kohlenstoffmenge entspricht. Es wird sowohl für die Vergangenheit als auch in der Gegenwart angenommen, dass globale Klimaänderungen über einen Rückkopplungsmechanismus mit der Kohlenstoffdynamik im Permafrost verbunden sind. Die Erwärmung der arktischen Region wird im Vergleich zum globalen Mittel als überdurchschnittlich stark prognostiziert (IPCC 2007, LEMBKE et al. 2007), was nach Modellrechnungen von ANISIMOV et al. (1999) bis zum Jahr 2100 zum Verschwinden des Permafrostes in bis zu 25 % seines heutigen Verbreitungsgebietes und zur teilweisen Degradation in den restlichen Gebieten führen könnte. Eine Erwärmung des gefrorenen Bodens kann zur Zunahme der saisonalen Auftauzone, zum verstärkten mikrobiellen Abbau von organischem Kohlenstoff und damit zur verstärkten Freisetzung von klimarelevanten Spurengasen wie Kohlendioxid, Methan und Stickoxid führen (SCHUUR et al. 2009). Ob arktische Tundren bereits als Kohlenstoffquellen (OECHEL et al. 2000, ZIMOV et al. 2006) oder noch als Kohlenstoffsenken (KUTZBACH et al. 2007, VAN DER MOLEN et al. 2007) wirken, ist regional unterschiedlich.

Durch Thermokarst- und Thermoerosionsprozesse werden gefrorene Sedimente auf Landschaftsebene tief reichend degradiert. Das kann zu Veränderungen des hydrologischen Regimes (GROSSE et al. 2011) sowie der lokalen ökologischen Bedingungen, zu massivem Bodenabtrag, zur Umlagerung und Mineralisation von organischer Substanz, zur Kohlenstoffmobilisierung (WALTER et al. 2007) und zur Freisetzung von im Permafrost fixierten fossilen Spurengasen führen (NELSON et al. 2001, YOSHIKAWA & HINZMAN 2003). Dabei wird vermehrt gelöste und partikuläre organische Substanz in die Hydrosphäre eingebracht (FREY & McCLELLAND 2009). Andererseits sind eine Erhöhung der Nettoprimärproduktion der Vegetation in den arktischen Gebieten und Verschiebung von Vegetationszonen, insbesondere die Ausbreitung der Taiga in vorherige Tundragebiete, zu erwarten, was eine Funktion der Arktis als Kohlenstoffsenke steigern könnte (McGUIRE et al. 2007). Allerdings wird aufgrund neuer Berechnungen spekuliert, ob die Arktis sich bereits zu einer Kohlenstoffquelle entwickelt (McGUIRE et al. 2010, HAYES et al. 2011). Der mit der globalen Erwärmung im Zusammenhang stehende Rückgang der Meereisbedeckung bewirkt in den arktischen Küstengebieten eine verstärkte Erosion von Kohlenstoffreichen Permafrostablagerungen (JONES et al. 2009, VASILIEV et al. 2005). Zusätzlich kann degradierender submariner Permafrost ebenfalls die Freisetzung von klimarelevanten Spurengasen in die Atmosphäre bewirken (SHAKHOVA et al. 2010).

**PERMAFROSTFORSCHUNG HEUTE**

Die heutige Permafrostforschung umfasst eine ständig wachsende und gut organisierte Wissenschaftlergemeinschaft. Insbesondere Länder, in denen Permafrost weiter verbreitet ist, weisen spezialisierte Forschungsstrukturen auf (Tab. 1 & 2).

Nachwuchswissenschaftler haben sich zum Beispiel im *Permafrost Young Research Network* (PYRN) zusammen geschlossen. Regelmäßig im Abstand von vier Jahren treffen

sich die Permafrostforscher zur *International Permafrost Conference* (ICOP); diese fasst den aktuellen Forschungsstand jeweils in umfangreichen Berichtsbänden eindrucksvoll zusammen (z.B. KANE & HINKEL 2008).

Neben diesen großen Konferenzen findet auf regionaler und nationaler Ebene ein intensiver Erfahrungsaustausch statt, zum Beispiel in der *European Permafrost Conference* (EUCOP), in den *Canadian Permafrost Conferences*, den Tagungen der russischen Permafrostforscher oder der *Asian Conference on Permafrost*.

Als Publikationsorgane stehen die Zeitschrift *Permafrost and Periglacial Processes* und das *News Bulletin* der *International Permafrost Association* (IPA), *Frozen Ground*, zur Verfügung. Des Weiteren wird von der *European Geosciences Union* (EUG) die Zeitschrift *The Cryosphere* als interaktives *Open Access Journal* herausgegeben.

Die Forschergemeinschaft betreibt zudem eigene Beobachtungsnetzwerke, die zum Teil schon über viele Jahre arbeiten wie zum Beispiel das *Arctic Circumpolar Coastal Observatory Network* (ACCO-Net), das *Global Terrestrial Network for Permafrost* (GTN-P), das *Circumpolar Active Layer Monitoring* (CALM), oder das *Permafrost Monitoring Switzerland* (PERMOS) und hat jüngst im Zuge des *International Polar Year* (IPY, 2007-2008) ein Netzwerk zu Temperaturbeobachtungen in Permafrostbohrungen aufgebaut (ROMANOVSKY et al. 2010; vgl. Abb. 1).

Heute werden Prozessstudien sowie langfristige Beobachtungen im Permafrost in zahlreichen arktischen Forschungsstationen durchgeführt, so zum Beispiel in Alaska (Barrow, Toolik, Bonanza Creek) oder in Kanada (z.B. Axel Heiberg Island) und Sibirien (Samoylov Insel, Jakutsk, Cherskii) wie auch auf Spitzbergen (Ny Alesund, Longyearbyen), Grönland (Zackenberget) und in Schweden (Abisko).

Die Forschungen zum Permafrost in allen seinen Erschei-

Institute und Organisationen	
International Permafrost Association (IPA)	<a href="http://ipa.arcticportal.org/">http://ipa.arcticportal.org/</a>
US Permafrost Association	<a href="http://www.uspermafrost.org/">http://www.uspermafrost.org/</a>
University of Alaska Fairbanks (UAF), Permafrost Laboratory, Geophysical Institute University of Alaska Fairbanks (UAF), Water and Environmental Research Centre (WERC)	<a href="http://www.permafrostwatch.org">http://www.permafrostwatch.org</a> <a href="http://ine.uaf.edu/werc/">http://ine.uaf.edu/werc/</a>
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI) Chinese Academy of Sciences	<a href="http://www.casnw.net/english/index.html">http://www.casnw.net/english/index.html</a>
Université Laval Quebec	<a href="http://www.cen.ulaval.ca/english/">http://www.cen.ulaval.ca/english/</a>
McGill University, Department of Geography, Montreal	<a href="http://www.geog.mcgill.ca/">http://www.geog.mcgill.ca/</a>
Moscow State University, Faculty of Geology, Chair for Geocryologie Moscow State University, Faculty of Geography, Chair for Cryology and Glaciology	<a href="http://www.geol.msu.ru/obsh/crl.htm">http://www.geol.msu.ru/obsh/crl.htm</a> <a href="http://www.geogr.msu.ru/cafedra/crio/">http://www.geogr.msu.ru/cafedra/crio/</a>
Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Jakutsk	<a href="http://www.sitc.ru/ync/ync_eng/ice.htm">http://www.sitc.ru/ync/ync_eng/ice.htm</a>
University Centre in Svalbard (UNIS)	<a href="http://www.unis.no/default.htm">http://www.unis.no/default.htm</a>
Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI)	<a href="http://www.awi.de/en/research/research_divisions/geosciences/periglacial_research/">http://www.awi.de/en/research/research_divisions/geosciences/periglacial_research/</a>

**Tab. 1:** Beispiele für Forschungseinrichtungen und Wissenschaftsorganisationen, die auf Permafrostuntersuchungen spezialisiert sind.

**Tab. 1:** Examples of research facilities and scientific organisations focused on permafrost studies.

Permafrost-Konferenzen	
Permafrost Young Research Network (PYRN)	<a href="http://pyrn.ways.org/">http://pyrn.ways.org/</a>
Proceedings of International Permafrost Conference (ICOP)	<a href="http://www.nicop.org/">http://www.nicop.org/</a>
European Permafrost Conference (EUCOP)	
Canadian Permafrost Conference	<a href="http://www.aina.ucalgary.ca/cpc/">http://www.aina.ucalgary.ca/cpc/</a> ,
Tagungen der russischen Permafrostforscher	
Asian Conference On Permafrost	<a href="http://www.casnw.net/permafrost/index.html">http://www.casnw.net/permafrost/index.html</a>
Zeitschriften	
Permafrost and Periglacial Processes	<a href="http://www3.interscience.wiley.com/journal/14053/home">http://www3.interscience.wiley.com/journal/14053/home</a>
Frozen Ground News Bulletin (IPA)	<a href="http://ipa.arcticportal.org/index.php/Frozen-Ground/">http://ipa.arcticportal.org/index.php/Frozen-Ground/</a>
The Cryosphere (open access), European Geosciences Union EUG	<a href="http://www.the-cryosphere.net/">http://www.the-cryosphere.net/</a>
Beobachtungsnetzwerke	
Arctic Circumpolar Coastal Observatory Network ACCO-Net	<a href="http://ipa.arcticportal.org/index.php/ACCO-net/">http://ipa.arcticportal.org/index.php/ACCO-net/</a>
Global Terrestrial Network for Permafrost GTN-P	<a href="http://www.gtnp.org/index_e.html">http://www.gtnp.org/index_e.html</a>
Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM	<a href="http://www.udel.edu/Geography/calm/">http://www.udel.edu/Geography/calm/</a>
Permafrost Monitoring Switzerland PERMOS	<a href="http://www.permos.ch/">http://www.permos.ch/</a>
International Polar Year (IPY 2007-2008)	<a href="http://ipy.arcticportal.org/">http://ipy.arcticportal.org/</a>
Permafrost-Monitoring in arktischen Forschungsstationen (Beispiele)	
Alaska Barrow Toolik Bonanza Creek	<a href="http://www.arcticscience.org/researchBases.php">http://www.arcticscience.org/researchBases.php</a> <a href="http://toolik.alaska.edu/">http://toolik.alaska.edu/</a> <a href="http://www.lter.uaf.edu/">http://www.lter.uaf.edu/</a>
Kanada Axel Heiberg Island	<a href="http://daleandersen.seti.org/Dale_Andersen/M.A.R.S..html">http://daleandersen.seti.org/Dale_Andersen/M.A.R.S..html</a>
Sibirien Samoylov Insel Jakutsk Cherskii	<a href="http://www.awi.de/de/infrastruktur/stationen/samoylov_station/">http://www.awi.de/de/infrastruktur/stationen/samoylov_station/</a> <a href="http://mpi.ysn.ru/">http://mpi.ysn.ru/</a> <a href="http://terrychapin.org/station.html">http://terrychapin.org/station.html</a>
Spitzbergen Ny Alesund, Longyearbyen	<a href="http://www.awipev.eu/">http://www.awipev.eu/</a> <a href="http://www.unis.no/">http://www.unis.no/</a>
Grönland Zackenberg	<a href="http://www.zackenberg.dk/">http://www.zackenberg.dk/</a>
Schweden Abisko	<a href="http://www.linnea.com/~ans/">http://www.linnea.com/~ans/</a>

**Tab. 2:** Übersicht über relevante Tagungen, Zeitschriften und Monitoring-Aktivitäten der internationalen Permafrostforschung.

**Tab. 2:** Overview of relevant conferences, journals and monitoring activities of the international permafrost research community.

nungen und Zusammenhängen wird sich in der Zukunft stärker öffnen, so dass klassische Geographen und Geologen möglicherweise eine Minderheit sein werden. Dafür werden Geophysiker, Klimaforscher und Biologen verschiedener Fachrichtungen aber auch Sozialwissenschaftler stärker präsent sein. Das wird die Art der Wissenschaft, aber auch der Forschungskooperation wesentlich verändern.

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Dr. G. Grosse und Prof. D. Thannheiser sowie bei der Redaktion der Zeitschrift für die sorgfältige Durchsicht unseres Manuskripts, für die kritischen Anmerkungen und zahlreichen hilfreichen Hinweise und Korrekturen.

### Literatur

- Ahlenius, H. (2007): Permafrost extent in the Northern Hemisphere. (June 2007).- In: UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. Retrieved 21:54, June 7, 2009 from <http://maps.grida.no/go/graphic/permafrost-extent-in-the-northern-hemisphere>.
- Boike, J., Hubberten, H.-W., Lantuit, H., Overduin, P.P., Schirmer, L., Wagner, D. & Huch, M. (2009): Permafrost und der globale Klimawandel.- Polarforschung 78(2): 129-132.
- Balobaev, V.T. (1991): Geothermie der gefrorenen Zone der Lithosphäre Nordasiens.- Novosibirsk, Verlag Nauka, 1-191. (in Russisch).

- Brown, J., Ferrians, jr. O.J., Heginbottom J.A., & Melnikov, E.S. (eds.) (1997): Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions.- Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000, 1 sheet.
- Embleton, C. & King, C.A.M. (1975): Periglacial geomorphology.- Glacial and periglacial geomorphology. 2<sup>nd</sup> ed.: 1-203.
- French, H.M. (2007): The periglacial environment.- Wiley, 1-458.
- Frey, K.E. & McClelland, J.W. (2009): Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry.- Hydrol. Process. 23: 169-182.
- Grosse, G., Harden J., Turetsky, M., McGuire, D.A., Camill, P., Tarnocai, C., Frolking, S., Schuur, E.A.G., Jorgenson, T., Marchenko, S., Wickland, K.P., French, N., Waldrop, M., Bourgeau-Chavez, L. & Striegl, R.G. (2011): Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance.- J. Geophys. Res. Biogeosci. 116: G00K06.
- Grosse, G. & Jones, B. (2011): Spatial distribution of pingos in northern Asia.- The Cryosphere 5: 13-33. doi: 10.5194/tc-5-13-2011.
- Hayes, D.J., McGuire, A.D., Kicklighter, D.W., Gurney, K.R., Burnside T.J., & Melillo, J.M. (2011): Is the northern high latitude land based CO2 sink weakening?- Global Biogeochem. Cycles 25: GB3018, doi:10.1029/2010GB003813
- IPCC (2007): Climate change 2007: the physical science basis.- Intergov. Panel on Climate Change, 1-996.
- Jones, B.M., Arp, D.C., Jorgenson, M.T., Hinkel, K.M., Schmutz, J.A. & Flint, P.L. (2009): Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska.- Geophys. Res. Lett. 36: L03503, doi: 10.1029/2008GL036205.
- Kane, D.L. & Hinkel, K.M. (eds) (2008): Proceedings of the 9th Internat. Conf. Permafrost 2008, Univ. Alaska Fairbanks, Inst. Northern Engineering 1-2100.
- Köppen, W. (1931): Grundriss der Klimakunde.- Walter de Gruyter, Berlin, 1-388.
- Köppen, W. & Geiger, R. (1954): Klima der Erde.- Wandkarte 1:16 Mill. Klett-Perthes, Gotha.
- Krautblatter, M. & Hauck, C. (2012): Neue Forschungsansätze zur räumlichen

- und zeitlichen Dynamik des Gebirgspermafrostes und dessen Naturgefahrenpotentials.- *Polarforschung* 81: 57-68.
- 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.- *Biogeosci.* 4: 869-890.
- Lantuit, H. & Schirrmeyer, L. (2012): Permafrost und Mensch.- *Polarforschung* 81: 69-75.
- Lembke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. & Zhang, T. (2007): Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground.- In: S. SOLOMON, D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.) (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.- Contrib. WG I Fourth Assessment Rep. IPCC.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 338-383.
- McGuire, A.D., Chapin, F.S.III, Wirth, C., Apps, M., Bhatti, J., Callaghan, T., Christensen, T.R., Clein, J.S., Fukuda, M., Maximov, T., Onuchin, A., Shvidenko, A. & Vaganov, E. (2007): Responses of high latitude ecosystems to global change: potential consequences for the climate system.- In: CANADELL, J.G., PATAKI, D.E. & PITEKKA, L.F. (eds), *Terrestrial ecosystems in a changing world.* The IGBP Series. Springer-Verlag, Berlin, 297-310.
- McGuire, A.D., Hayes, D.J., Kicklighter, D.W., Manizza, M., Zhuang, Q., Chen M., Follows, M.J., Gurney, K.R., McClelland, J.W., Melillo, J.M., Peterson, B.J. & Prinn, R.G. (2010): An analysis of the carbon balance of the Arctic Basin from 1997 to 2006.- *Tellus* 62B: 455-474.
- Nelson, F.E., Anisimov, O.A. & Shiklomanov, N.I. (2001): Subsidence risk from thawing permafrost.- *Nature* 410: 889-890.
- Oechel, W.C., Vourlitis, G.L., Hastings, S.J., Zulueta, R.C., Hinzman, L. & Kane, D. (2000): Acclimation of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming.- *Nature* 406: 978-981.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J. & Stangenberger, A.G. (1982): Soil carbon pools and world life zones.- *Nature* 298: 156-159.
- Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Christiansen, H.H. (2010): Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007-2009: a synthesis.- *Permafrost Periglac. Proc.* 21:106-116.
- Sachs, T., Langer, M. & Schirrmeyer, L. (2012): Permafrost in den arktischen und subarktischen Tiefländern.- *Polarforschung* 81: xx-xx.
- Schuur, E., Vogel, J., Crummer, K., Lee, H., Sickman, J. & Osterkamp, T. (2009): The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra.- *Nature* 459: 556-559.
- Schwamborn, G., Hauck, C. & Zubrzycki, S. (2012): Dynamik des antarktischen Permafrostes.- *Polarforschung* 81: 47-55.
- Shakhova, N., Semiletov, I., Salyuk, A., Yusupov, V., Kosmach, D. & Gustafsson, O. (2010): Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf.- *Science* 327: 1246-1250.
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. & Zimov, S. (2009): Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region.- *Global Biogeochem. Cycles* 23: GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.
- van Everdingen, R. (ed.) (1998, revised May 2005): *Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms.- National Snow and Ice Data Center / WDC Glaciol., Boulder, CO. /http://nsidc.org/fgdc/ glossary/.*
- van der Molen, M.K., van Huissteden, J., Parmentier, F.J.W., Petrescu, A.M.R., Dolman, A.J., Maximov, T.C., Kononov, A.V., Karsanaev, S.V. & Suzdalov, D.A. (2007): The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia.- *Biogeosci.* 4: 985-1003.
- Vasiliev, A., Kanevskiy, M., Cherkashov, G. & Vanshtein, B. (2005): Coastal dynamics at the Barents and Kara sea key sites.- *Geo-Mar. Lett.* 25: 110-120 doi: 10.1007/s00367-004-0192-z.
- Venzke, J.F. (1998): Schnee und Dauerfrost - Die kalten Aspekte borealer Waldlandschaften.- In: R. FENNER (Hrsg.): *Taiga-Focus Ökozid* 14: Gießen, 56-71.
- Walter, K.M., Edwards, M.E., Grosse, G., Zimov S.A & Chapin, F.S. (2007): Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH<sub>4</sub> during the Last Deglaciation.- *Science* 318: 633-636.
- Washburn, A.L. (1979): *Geocryology: a survey of periglacial processes and environments.-* Edward Arnold, 1-406.
- Weise, O.R. (1983): *Das Periglazial.-* Berlin, Stuttgart, Gebrüder Bornträger, 1-199.
- Wetterich, S., Overduin, P. & Lantuit, H. (2012): Arktische Küsten im Wandel.- *Polarforschung* 81: xx-xx.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. & Armstrong, R.L. (2003): Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere.- In: M. PHILLIPS, S.M. SPRINGMAN & L.U. ARENSON (eds), *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland.* A.A. Balkema, Lisse, the Netherlands, 1289-1294.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A. & Brown, J. (1999): Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere.- *Polar Geography* 23: 147-169.-
- Zimov, S.A., Schuur, E.A.G. & Chapin, F.S. (2006): Permafrost and the global carbon budget.- *Science* 312 (5780): 1612-1613.