

Polarforschung 81 (1), 69 – 75, 2011 (erschienen 2012)

Permafrost und Mensch

von Hugues Lantuit¹ und Lutz Schirrmeister¹

Kurzfassung: Permafrost, ein thermischer Zustand des Untergrundes, war lange Zeit ein unbekanntes Phänomen gewesen, das auf den ersten Blick nicht mit dem menschlichen Auge entdeckt werden konnte und das vor allem in Gebieten weit verbreitet war, die einer relativ geringen wirtschaftlichen Nutzung unterlagen. Es gibt zahlreiche und vielfältige Wechselwirkungen zwischen Permafrost und Mensch. Ansteigende Lufttemperaturen in Arktis und Antarktis sowie in Hochgebirgsregionen und nachfolgend ansteigende Temperaturen des gefrorenen Untergrundes können zu einer Bedrohung von Infrastrukturen in Permafrostregionen der höheren Breiten und Gebirgen führen.

Beschleunigte Bewegungen von Blockgletschern, größere Risiken von Naturkatastrophen in Gebirgsregionen, verstärkte Erosion von Permafrostküsten und die Gefahr des Austauens von Gashydraten können in großem Umfang Auswirkungen auf den Menschen haben. Die Menschheit hat gelernt, Permafrost als Baugrund zu nutzen und versucht seine besonderen Eigenschaften auszunutzen um bereits in der Vergangenheit im Sommer Lebensmittel zu lagern oder um heutzutage z.B. in großem Umfang Pflanzensamen zu konservieren oder CO₂ einzulagern. In der mikrobiologischen Forschung wird zudem versucht die genetischen Informationen von angepassten Mikroorganismen im Permafrost zu entschlüsseln. Die steigende Anzahl von wirtschaftlichen Aktivitäten in der Arktis, der Antarktis und den Gebirgsregionen wird zusätzlich beträchtliche Belastungen des Permafrostsystems schaffen und erfordert eine umfassende Beobachtungsstrategie für den Permafrost.

Abstract: Permafrost, a thermal condition of the ground, has long been an understated phenomenon because it is not necessarily detectable by the human eye and because it is found in areas that had little economic relevance for mankind. Permafrost-man interactions are however many and manifold. Rising air temperatures in the Arctic, Antarctic and the high mountain regions and consequently rising permafrost temperatures have resulted in great threats on infrastructure of the higher latitudes northern and mountain, even though man had learnt to build on permafrost since thousands of years in some cases. Accelerating rock glaciers, greater risk of natural hazard in mountain regions, stronger coastal erosion and the danger of gas hydrates thawing are all anthropogenic impacts to a certain extent. Mankind has however also learnt to use the permafrost regions and sought to exploit it early on for its freezing properties in summer to store goods, or recently on a larger scale to protect seeds, to store carbon dioxide or even to extract information from permafrost bacteria in genetic research. The growing number of economic activities in the Arctic, the Antarctic and mountain regions will create considerable challenges for the permafrost environment and prompts the need for comprehensive monitoring strategies of permafrost.

EINFÜHRUNG

Das Auftreten von Permafrost besagt, dass der Untergrund dauerhaft gefroren ist, Eis enthalten kann, und dadurch andere geotechnische und hydrologische Eigenschaften besitzt als nicht gefrorener Untergrund (ANDERSLAND & LADANYI 1994, TSYTOVICH 1975). Eishaltiger, bis in größere Tiefen dauerhaft gefrorener Untergrund besitzt nahezu Eigenschaften wie Festgestein und kann die Festigkeit von Stahlbeton übertreffen (WILLIAMS & SMITH 1989). Dies macht Permafrost sowohl zu

einer natürlichen Barriere gegenüber Gas- und Wassermigration als auch zu einem sehr stabilen Baugrund (OSTROUMOV et al. 1998). Bei Tiefbauarbeiten wird die hohe Festigkeit bereits seit langem durch künstliches Gefrieren von Sedimenten oder Felsgestein erzeugt, um die Untergrundstabilität für anspruchsvolle Bauwerke zu verbessern (JONES 1981, SADOVSKY & DORMAN 1981).

Temperaturveränderungen im Permafrost wie sie im Zuge der globale Erwärmung prognostiziert und von SACHS et al. (2011, dieses Heft) beschrieben werden, sind deutliche Hinweise darauf, dass das thermische Regime des gefrorenen Untergrundes nicht vollkommen stabil ist. Dies kann die geotechnischen Eigenschaften des Permafrosts stark ändern und sogar zu katastrophalen Ereignissen führen. Die Gefahr solcher „Geohazards“ wird häufig übersehen, da Permafrost mit menschlichen Augen schwer erkennbar ist. Aus gleichem Grunde sind die menschlichen Einwirkungen auf den Permafrost im Allgemeinen nicht zeitnah und realistisch zu beurteilen. Die Verzögerung zwischen dem Erkennen einer Gefahr und seiner Ursachen sowie der Entscheidungsfindung ist sehr groß. Das stellt eine große Herausforderung an zukünftige Planungen dar. Die komplexe Natur der Wechselwirkungen zwischen Permafrost und Mensch ist schwer zu erfassen. Sie besteht in verschiedenen Szenarien, die trotz der entfernten Standorte (sowohl in hohen Breiten als auch in großen Höhen der Gebirge) direkte Auswirkungen auf die Bevölkerung in den niederen Breiten und in tiefer gelegenen Regionen haben.

In diesem Sinne kann man zwischen direkter Einwirkung des Menschen auf den Permafrost (z.B. durch Bauwerke und Zerstörungen der oberen Permafrostzone) und indirekter Einwirkungen (z.B. durch den anthropogen verstärkten globalen Klimawandel) unterscheiden. Dessen ungeachtet wird das Permafrostsystem und sein thermisches Gleichgewicht fortwährend auch durch natürliche Prozesse (z.B. der Erosion, Überflutung und Entwässerung) verändert.

AUSWIRKUNGEN DER PERMAFROSTDYNAMIK IN DER MENSCHLICHEN VERGANGENHEIT

Permafrost als ein thermischer Zustand des Untergrundes ist von den Wechseln der Lufttemperatur abhängig und seine Eigenschaften haben sich in der Vergangenheit so entwickelt, dass es zu einer Reihe von Einwirkungen auf die Menschheit und die Zivilisation kam.

Das Auftreten von Permafrost wirkte auf prähistorische Zivilisationen z.B. durch die Art der Vegetation, die auf dem gefrorenen Untergrund wachsen konnte. Die Vegetation wird vor allem durch die Tiefe der Auftauschicht und die hydrologi-

¹ Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Forschungsstelle Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Deutschland; <hugues.lantuit@awi.de>; <lutz.schirrmeister@awi.de>

Manuskript eingegangen am 26. Mai 2011, überarbeitet zum Druck angenommen am 16. Januar 2012.

schen Verhältnisse bestimmt. Ihre breitenbezogene Fluktuation (z.B. der Waldgrenze) führte zu Verschiebung von Lebensräumen und zu veränderter Verfügbarkeit von Nutzpflanzen und von jagdbarem Wild. Prähistorische und frühhistorische Migrationen auf dem Tibetplateau waren z.B. teilweise durch die Permafrostentwicklung und ihre Einwirkung auf die Vegetation bestimmt (HOU et al. 2010).

In späteren Zeiten kam es im Zusammenhang mit Permafrostdegradation zum Versinken von Siedlungen. Ein Beispiel dafür sind Siedlungsreste der Wikinger im Süden Grönlands und auf Neufundland. Die Permafrostodynamik spielte sowohl direkt beim Rückgang der Wikingerbevölkerung als auch indirekt bei der Herausbildung ihres Glaubens (z.B. beim Totenkult und der Beerdigung der Toten) eine wichtige Rolle (FITZHUGH & WARD 2000).

EINWIRKUNG AUF INFRASTRUKTUR UND BAUWERKE

Spuren von Bautätigkeit im Permafrost sind bereits aus den frühen arktischen Siedlungen überliefert. Inuit Siedler nutzen den Permafrost um ihre Lebensmittel im Sommer zu lagern, um die Stabilität früher Behausungen zu sichern, und sie lernten auch die Frosteigenschaften zu bewahren, indem sie einfache Torfabdeckungen zur Isolation einsetzten (FRIESE 1998). Der große Fortschritt beim Bauen im Permafrost fand mit der Expansion des modernen Russlands nach Fernost statt und vor allem mit dem Bau der Transsibirischen Eisenbahn am Ende des 19. Jahrhunderts und danach (SHIKLOMANOV 2005). Umfangreiches Spezialwissen entstand durch die Schaffung unzähliger Bauwerke wie Brücken, Dämme und Tunnel (MULLER 2008) in und auf gefrorenem Untergrund. Die Hauptsorge der Ingenieure galt der direkten Einwirkung der Bauwerke auf das thermische Regime. Viele dieser Bauwerke entlang der Transsibirischen Eisenbahn die über tausende Kilometer durch die Zone des diskontinuierlichen Permafrostes verläuft, sind bis heute erhalten. Die große Variabilität der Permafrostparameter unter sehr unterschiedlichen Landschaften (z.B. Steppen, Taiga, Moore, Flusstäler, Gebirgszüge) und das Auftreten von Grundeis in vielfältiger Form (z.B. massives Eis, Poreneis, Eislinsen) macht das Bauen im Permafrost eher zu einer Disziplin von Ausnahmen als von Gesetzmäßigkeiten und schafft kaum erfüllbare Anforderungen selbst an die sachkundigsten Ingenieure. Die Einwirkungen des tauenden Permafrostes auf die Infrastruktur sind vielfältig und betreffen Gebäude, Straßen, Eisenbahnen, Strom-, Öl- oder Gasleitungen sowie Industrieanlagen und Nachrichtenverbindungen (U.S. ARCTIC RESEARCH COMMISSION 2003, COUTURE et al. 2000). Während einige negative Einwirkungen auf fehlende Kenntnisse während der Planung und beim Bauen zurückzuführen sind, resultieren eine erhebliche Anzahl aus den unvorhersehbaren Reaktionen der Erdoberfläche und des Untergrundes auf schmelzendes Eis und sich ändernder Stabilität.

Es ist nicht selten, dass man Bauwerke in unterschiedlichen Grad der Zerstörung in Alaska, im nördlichen Kanada oder auch in manchen dicht besiedelten Städten Sibiriens sieht. Beim Bauen im Permafrost versucht man traditionell die Erwärmung des Baugrundes durch Pfeilerbau und/oder die Einsetzung von Thermosyphons zu verhindern, die den Unter-

grund kühlen (ZARLING & HAYNES 1991). Eine Vertiefung der Auftauzone oder einfach das Verschwinden von Permafrost wurde häufig bei der Bauplanung nicht in Betracht gezogen. Beim Auftauen der oberflächennahen Schichten mit unterschiedlichen Eisgehalten beginnen die Gebäude sich gefährlich zu verformen (Abb. 1 und 2), was letztlich zum Zusammenbruch führen kann. Die aktuelle globale Erwärmung stellt eine allgegenwärtige Bedrohung für die auf Permafrost gebaute Infrastruktur dar. Daher wurde in den letzten Jahren versucht, Richtlinien für das Bauen in Permafrostgebieten zu erarbeiten, die die veränderten geotechnischen Eigenschaften des sich erwärmenden Permafrost-Baugrundes zum Inhalt haben (vgl. HAYLEY & HORNE 2008, INSTANES et al. 2005, BOMMER et al. 2010). Einige moderne Großprojekte wurden in den letzten Jahrzehnten in Alaska und in China realisiert. Die ca. 1300 km lange Trans-Alaska-Leitung verbindet die Erdölfördergebiete von Prudhoe Bay im arktischen Norden Alaskas mit dem Erdölhafen Valdez im gemäßigteren Süden. Sie wurde 1977 fertig gestellt und



Abb. 1: Aufgegebene Gebäude im Hafen von Tiksi (Nordsibirien) die durch das Tauen von Permafrost verformt wurden (Foto: H. Lantuit 2005).

Fig. 1: Abandoned building at the port of Tiksi (North Siberia) deformed due to thawing of permafrost (Photo: H. Lantuit 2005).



Abb. 2: Blockhaus in Jakutsk, das vermutlich durch die Wärme der Gebäudeheizung und unzureichende Isolierung in den aufgetauten Permafrostgrund eingesunken ist (Foto L. Schirrmeister 2001).

Fig. 2: Blockhouse in Yakutsk sunk, probably due to heat warmth and insufficient insulation, into the thawed permafrost (Photo: L. Schirrmeister 2001).

verläuft mehrere hundert Kilometer über und im kontinuierlichen und diskontinuierlichen Permafrost (Abb. 3a). Die Qualität dieses Ingenieurwerks und die sorgfältige Konstruktion lassen nicht erwarten, dass seine Funktion und Sicherheit vom globalen Klimawandel bedroht wird (JOHNSON & HEGDAL 2008). Auf ähnliche Weise wurde die Qinghai-Tibet-Eisenbahn gebaut. Diese insgesamt etwa 1150 km lange Eisenbahntrasse verläuft seit 2006 im Tibetischen Hochland über 550 km Permafrost und hat mehrere spektakuläre Bauwerke erfordert. So werden auch hier besonders gefährdete Streckenabschnitte mit Thermosiphons gekühlt (Abb. 3b).



Abb. 3: Große Bauwerke in Permafrostgebieten: A = Transalaska-Ölleitung bei Fairbanks, inneres Alaska Thermosiphons in den Stützen leiten durch passive Konvektion des wasserfreien Ammoniaks die Wärme (50 °C) des durch die Rohrleitung fließenden Öls ab. (Foto: L. Schirrmeister 2004). B = Thermosiphons an der Qinghai-Tibet-Eisenbahn bei der Beiluhe Station auf 4600 m NN (Foto: H.-W. Hubberten 2006).

Fig. 3: Large building in permafrost regions: A = Transalaska crude oil pipeline near Fairbanks, central Alaska (Photo L. Schirrmeister, 2004). B = Thermosiphons along the Qinghai-Tibet Railway at Beiluhe Station on 4600 m above sea level (photo: H.-W. Hubberten, 2006).

Permafrost wirkt wie eine Art Zement für die meisten oberflächennahen Gesteine und Sedimente. Das trifft in Gebirgsregionen auch für viele Felsengipfel oberhalb einer bestimmten Höhe zu (vgl. KRAUTBLATTER & HAUCK 2012, dieses Heft). Das Tauen des Permafrosts kann dort den Zusammenhalt großer Felsmassive aufheben und plötzliche Erdbeben und Felsstürze auslösen, die auch bewohnte Gebiete bedrohen. Der Maßstab solcher Ereignisse geht weit über das hinaus, was normalerweise an Erdbeben in diesen Regionen beobachtet wird. Ähnliche Ereignisse fanden nur in wärmeren Klimaperioden in den letzten 2000 Jahren statt. Die Zugspitze ist wahrscheinlich eines der besten Beispiele für einen Berggipfel im Übergang vom gefrorenen in den ungefrorenen Zustand (GUDE & BARSCH 2005). Abschätzungen der Einwirkungen des vollständigen Tausens von Permafrost auf diesen Gipfel übertreffen sehr große Erdbeben, da nicht nur die Zugspitze direkt betroffen wäre, sondern auch die Täler in der Umgebung.

Eine typische Geländeform im Gebirgspermafrost sind Blockgletscher. Sie sind weit verbreitet und unterliegen verstärkter Bewegung bei steigenden Lufttemperaturen (ROER et al. 2008). Ihre Spuren erstrecken sich immer weiter hinunter in die Täler, wo sie die Wege der Gebirgsgletscher und des Schmelzwassers blockieren können und Stauseen entstehen lassen, die dann katastrophal entwässern und dabei tiefer liegende bewohnte Gebiete verwüsten können. Laufende Untersuchungen zur Entwicklung von Blockgletschern mutieren zunehmend zu langfristigen Beobachtungsprogrammen (DELALOYE et al. 2008, ROER et al. 2008) die dauerhaft betreut werden müssen.

Die Wirkung tauenden Permafrosts ist auch sehr deutlich in den arktischen Küstengebieten erkennbar (siehe WETTERICH et al. 2012, dieses Heft). Die Küstenerosion zerstört hier große Landabschnitte mit eisreichem Permafrost, reduziert die Lebensräume der arktischen Flora und Fauna und bedroht die Infrastrukturen der Menschen (LANTUIT et al. 2011). Die prognostizierte erhöhte Anzahl von Stürmen, die die Küsten in der eisfreien Periode beeinflusst, wird die Planer zwingen, Anpassungsstrategien zu modifizieren. In Tuktoyatuk (Nordwestkanada) musste zum Beispiel das Schulgebäude des Ortes versetzt werden, um einen Absturz ins Meer zu vermeiden, während die übrige Ortschaft dauerhaft durch aufwändige Steinaufschüttungen geschützt werden muss (JOHNSON et al. 2003). Auf der Herschel-Insel, einem Kandidaten für eine *World Heritage Site* der Inuit-Kultur in Nordwestkanada, mussten Kulturgüter bereits mehrfach umgesetzt werden, um zu vermeiden, dass sie durch Wellen zerstört werden (LANTUIT & POLLARD 2008). An der Küste der Karasee in Russland wurden große Anlagen der Öl- und Gasindustrie regelmäßig von anrollenden Wellen angegriffen und gehen zunehmend im Meer verloren (OGORODOV et al. 2010). In vielen dieser Küstengebiete, die gerade eine zunehmende Beachtung durch die Öl- und Gasindustrie erleben, stellt das Tauen und die Abtragung von Küstenpermafrost neue Herausforderung an die Planung von Rohrleitungen, künstlichen Bohrinseln und Hafenanlagen. Nachdem die Europäische Union deutlich ihr Interesse an der Arktis und ihre Verpflichtung zum Umweltschutz in den arktischen Küstenregionen betont hat (EUROPEAN COMMISSION 2008), erfordern die aktuellen Veränderungen auch einen verstärkten europäischen Einsatz der Untersuchung des Küstenpermafrosts.

Gashydrate finden sich in großem Umfang eingeschlossen unter dem submarinen Permafrost der arktischen Kontinental-schelfe (COLLETT & DALLIMORE 2000). Die Menge an verfügbaren Gashydraten ist schwer einzuschätzen und hat zu spektakulären Hochrechnungen über diesen Rohstoff geführt (vgl. WETTERICH et al. 2012, dieses Heft). Gashydrate sind erwiesener Maßen eine potentielle Energiequelle. Pilotprojekte in der kanadischen Arktis haben die Nutzbarkeit dieser Hydrate bereits erkundet. Geschlossen wurde, dass ihre Erkundung und Gewinnung eine Zukunftsangelegenheit ist, die für die Industrie von großem Interesse ist (BELLEFLEUR et al. 2007, RIEDEL et al. 2009). Allerdings steht die notwendige Kartierung des submarinen Permafrosts noch am Anfang und es ist noch nicht geklärt wie seine Verbreitung sowohl die Freisetzung als auch die mögliche Gewinnung von Gashydraten beeinflusst. Eine Erwärmung der relativ flachen arktischen Küstengewässer könnte zu drastischen Veränderungen in der Stabilitätszone der Gashydrate führen (ROMANOVSKY et al. 2005) und eine industrielle Nutzung würde diese Veränderungen sicherlich noch verstärken.

Die Menschheit insgesamt ist sicherlich für viele Veränderungen im Permafrostbereich verantwortlich. Der anthropogene Beitrag zur globalen Erwärmung gilt als gesichert. Insbesondere die Arktis hat schon drastische Erhöhungen der Lufttemperatur erfahren und vermutlich die stärksten Temperaturveränderungen während des zwanzigsten Jahrhunderts erlebt. Dementsprechend, obwohl die Treibhausgasemissionen überwiegend in den gemäßigten Breiten entstammen, werden sich die anschließenden Rückkopplungen auf das Klimasystem, einschließlich des Permafrostsystems, hauptsächlich in den höheren Breiten auswirken.

Der Mensch ist auch für lokale Einwirkungen verantwortlich, die, zusammengenommen, wesentlich zu Veränderungen des thermischen Regimes im Untergrund beitragen. In der Antarktis hat z.B. auf der Antarktischen Halbinsel der Tourismus mit der steigenden Anzahl an Besuchern lokal deutlich die Oberfläche verändert, was auch zu Veränderungen im darunter liegenden Permafrost führt (CAMPBELL et al.



Abb 4: Blick aus einem Hubschrauber auf das Küstentiefland der Lapteeweese. Die Spuren von Kettenfahrzeugen in der Tundra lassen die Zerstörung der Pflanzendecke erkennen, was zur Degradierung des Permafrosts führt (Foto F. Kienast August 2007).

Fig. 4: Helicopter view of traces of track vehicles in the tundra result in destruction of the vegetation cover and initial permafrost degradation (Photo F. Kienast August 2007).

1998). Ähnlich hat im nördlichen Alaska oder im nördlichen Russland die Nutzung von Geländefahrzeugen in Kombination mit verstärkten industriellen Aktivitäten schon irreparable Spuren in der Tundra hinterlassen, die gleichfalls das thermische Regime unter der Oberfläche beeinflussen (SLAUGHTER et al. 1990) (Abb. 4). Und auch in Gebirgsregionen hat der Aufbau von Infrastrukturen zusammen mit dem Touristenstrom, der in einigen Gebieten vor mehr als ca. 100 Jahren begann, das thermische Gleichgewicht des felsigen Untergrundes gestört (CHENG & LI 2003).

TENDENZEN IN DER ANGEWANDTEN PERMAFROST-FORSCHUNG

Die Bemühung Permafrost zu nutzen, hat zu großen technischen Fortschritten bei der Anwendung, Bewahrung und Beherrschung seiner besonderen Eigenschaften geführt (Abb. 5). Die anwendungsorientierte Permafrostforschung führt zu einem besseren Prozessverständnis und verbessertem Umgang mit teilweise katastrophalen Ereignissen in wirtschaftlich bedeutenden Permafrostgebieten (z.B. Bergbaugebiete oder Tourismuszentren). Auf der Basis langfristiger Messreihen und numerischer Modelle wurde das Wissen um Wärmeaustausch und thermische Phänomene im gefrorenen Untergrund wesentlich vergrößert. In Bezug auf die technischen Möglichkeiten wurden zudem eine ganze Reihe von praktischen Lösungen zu beständigem Baumaterial und Untergrundstabilität entwickelt, um das Bauen auf Permafrost sicherer und dauerhafter zu gestalten (BOMMER et al. 2010, INSTANES et al. 2005, GRUBER 2011).



Abb 5: Thermosyphons zum Abkühlung des gefrorenen Untergrundes an einem Gebäude in Inuvik, North West Territory, Canada (Foto: H. Lantuit 2006).

Fig. 5: Thermosyphons to cool the frozen ground at a building in Inuvik, North West Territory, Canada (Photo H. Lantuit 2006).

In der Vergangenheit wurde Permafrost in den hohen Breiten vor allem von der einheimischen Bevölkerung genutzt, um Nahrungsmittel einzulagern. Inzwischen wurde erkannt, dass Permafrost eine Möglichkeit bietet, dieses auch in größerem Maßstab umzusetzen. Die globale Saatgutbank (*Svalbard Global Seed Vault*), die 2008 auf Spitzbergen eingerichtet

wurde (Abb. 6), demonstriert das Potential von Permafrost, annähernd stabile thermische Bedingungen zu gewährleisten, um einige der wertvollsten biologischen Ressourcen der Erde zu bewahren. Die Bank beherbergt jetzt 400.000 Samenproben von Kulturpflanzen, die im gefrorenen Festgestein einer ehemaligen Kohlegrube – gut gekühlt – aufbewahrt werden.

Von Wissenschaftlern wurde auch vorgeschlagen, den Untergrund im Permafrost zu nutzen um atmosphärischen Kohlenstoff in Form von Gashydraten zu speichern um so den Anstieg von Treibhausgas in der Atmosphäre auszugleichen (MELNIKOV & DROZDOV 2006). Nur wenige Untersuchungen haben jedoch bisher die Machbarkeit einer solchen Kohlenstoffspeicherung angedeutet. Zudem würde ein theoretischer Erfolg dieses Vorhabens vermutlich durch die prognostizierte Verringerung der Permafrostverbreitung wieder eingeschränkt werden (LOMBARDI et al. 2006).

Mit der Verstärkung einer Forschung zur CO₂-Speicherung wird der Permafrost als potentieller Speicher sicherlich in den Brennpunkt zahlreicher Untersuchungen gelangen. Die Speicherung von Öl, Ölprodukten und die Deponie giftiger Industrieabfälle ist bereits heute Wirklichkeit in der Arktis (CHUVILIN et al. 2000) und schon heute werden umfangreiche Anstrengungen unternommen, um die Auswirkungen des sich erwärmenden Permafrosts auf diese Standorte zu mildern oder auch die Abfälle aus der Natur zu entfernen.

Mikrobiologische Forschung im Permafrost hat zur Entdeckung einer großen Anzahl von Mikroben und Bakterien geführt, die dafür bekannt sind, dass sie auch bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt überleben können und aktiv sind. Die oftmals unerwartete Anpassungsfähigkeit dieser Lebensformen hat zur Entstehen eines neuen Zweiges der angewandten Mikrobiologie geführt, um diese Organismen, die stabil gegenüber tiefen Temperaturen sind, zu nutzen (z.B. MINDLIN et al. 2008). Durch Züchtungen wird versucht, Bakterien zu verändern bzw. neue zu schaffen, die fähig sind, die Auswirkung von Ölkatastrophen und Industrieabfällen in Permafrostgebieten zu mildern (MARGESIN & SCHINNER 1999). Vor kurzem wurden in 30.000 Jahre altem Permafrost im kanadischen Yukongebiet DNA-Sequenzen bestimmt, die Resistenzen gegenüber bestimmten Antibiotika verursachen können (D' COSTA et al. 2011). Damit ist belegt, dass solche Resistenzen eine alte natürliche Ursache haben können und nicht ausschließlich eine moderne Reaktion auf die erst vor 70 Jahren entwickelten Antibiotika sind.

PROGNOSEN FÜR DIE ZUKUNFT

Es ist nicht einfach, die Auswirkung von Veränderungen im Permafrost in ökonomischen oder menschlichen Begriffen zu quantifizieren. Die unterschiedlichen Größenordnungen, in denen Permafrostprozesse stattfinden und die zahlreichen Wege auf denen sie Infrastrukturen und globales Klima beeinflussen können, macht die Aufgabe einer ökonomischen Kostenabschätzung scheinbar unlösbar. Die Degradation von Permafrost führt lokal zum Zusammenbruch von Gebäuden, zur Zerstörung von Küsteninfrastrukturen und zu katastrophalen Ereignissen in Gebirgsregionen. Diese können, wenn sie im Laufe des nächsten Jahrhunderts im Zusammenhang mit sich erwärmendem Permafrost gehäuft stattfinden, bis zu



Abb 6: Eingangsgebäuden der globalen Saatgutbank in Longyearbyen auf Spitzbergen Bis zu 4,5 Millionen Samenproben sollen bei -18 °C gekühlt konserviert werden. Die natürliche Permafrosttemperatur beträgt -3,5 °C. Die 120 m lange Anlage wurde in einer alten Kohlegrube eingerichtet (Foto H. Lantuit 2010).

Fig. 6: Entrance building of the Svalbard Global Seed Vault in Longyearbyen. Up to 4,5 million seed samples should be frozen preserved at around -18 °C. The ground temperature is -3,5 °C. The 120 m long facility was established in an old coal mine (Photo: H. Lantuit 2010).

einigen Billionen Euro und mehr kosten. Aber die Veränderungen im Permafrost wirken auch direkt auf die globale Umwelt und auf globale Kreisläufe, die schwer durch einfache Schadensberechnungen erfasst werden können. Die enorme Masse an organischem Kohlenstoff, der in Permafrostböden erhalten ist und die großen Mengen an Gashydraten, die unter dem submarinen Permafrost eingeschlossen sind, stellen eine enorme potentielle Ressource zur Freisetzung von Treibhausgas dar, was wiederum die prognostizierte globale Erwärmung verstärken würde. Eine einfache Kombination der von der Wissenschaft bereitgestellten aktuellen Zahlen – im Permafrost ist ohne Berücksichtigung der Gashydrate doppelt so viel Kohlenstoff gespeichert wie in der Atmosphäre – macht deutlich, dass eine Degradation des Permafrosts erhebliche Folgen für das globale Klima mit sich bringen würde. Auch die finanziellen und ökonomischen Folgen eines Tauens von Permafrost sind, vorsichtig ausgedrückt, bisher dramatisch ignoriert worden.

Ein verbesserter Zugang zu einigen arktischen Regionen und der potentiell einfachere Zugang zu den Ressourcen wie Erzen und Kohlenwasserstoffen speziell auf den heute noch von Permafrost unterlagerten Schelfgebieten, wird oft als eine Möglichkeit gesehen, die Kosten einer Permafrostdegradation zu kompensieren. Allerdings wird der dynamische Charakter der Veränderungen im Permafrost besonders schwierige Bedingungen für eine industrielle Gewinnung von Rohstoffen in diesen Regionen schaffen und damit eine Kompensation erheblich relativieren.

FORSCHUNGSBEDARF

Die Permafrostforschung ist eine vielseitige und offene Disziplin. Sie umfasst Forschungen auf unterschiedlichen Skalen und Spezialgebieten und ist ein gutes Beispiel für die Multidisziplinarität bei der Erforschung von Umwelt- und Klimaveränderungen. Die moderne Permafrostforschung wird vor



allein von Geologen, Geographen, Bodenkundlern, Physikern, Hydrologen, Klimatologen und Mikrobiologen durchgeführt. Sie schließt zunehmend auch Sozialwissenschaftler ein, die Permafrosteinwirkungen bei der lokalen und regionalen Planung erkunden. Zudem wird es eine weiter verstärkte Zusammenarbeit zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften geben müssen, um die Wechselwirkungen zwischen und in den vom Menschen beeinflussten bzw. geschaffenen Systemen zu verstehen und wo nötig steuernd zu beeinflussen

Die Vielfalt der Spezialgebiete, die in Forschungsvorhaben zum Permafrost einbezogen sind, erfordert sowohl eine breite, ständig zu erweiternde Basis der Kenntnisse als auch den Ausbau der Forschungslogistik, um anspruchsvolle Spitzenforschung in gefährlichen und weit entfernten Gebieten der Erde durchzuführen. Außerdem muss die Permafrostforschung den globalen, regionalen und lokalen Charakter der zu untersuchenden Prozesse begreifen. Alle diese Aspekte sind in Studien zusammenzuführen, die auf einer langfristigen Basis funktionieren. Dieser präzise Rahmen setzt ein hohes zweckbestimmtes und langfristiges Engagement von Forschungseinrichtungen zum Unterhalt von Beobachtungsinstrumenten in einem sehr anspruchsvollen Umfang hinsichtlich der verfügbaren Ressourcen voraus. Obwohl die Permafrostforschung die wissenschaftlichen Fragen deutlich erkannt hat, die es in den nächsten zwanzig Jahren anzusprechen gilt, muss weiter daran gearbeitet werden, die Energien zu bündeln, um diese Fragen zu beantworten.

Größere globale Beobachtungsnetzwerke (Tab.1) werden zunehmend auf Grundlagendaten zum Permafrost zugreifen und haben die Permafrostforscher gebeten solche Informationen zu erstellen und zur Verfügung zu stellen. Das 21. Jahrhundert sollte einen Meilenstein für Permafrostbeobachtungen markieren, wenn die notwendige Beachtung für Feldbeobachtungen von den Regierungen und internationalen Organisation gleichfalls unterstützt wird.

Name	Akronym	Typ	Webseite
Global Terrestrial Network for Permafrost	GTN-P	thematisch	www.gtnp.org
Global Climate Observing System	GCOS	global	www.wmo.int/gcos
Global Terrestrial Observing System	GTOS	global	www.fao.org/gtos
Global Cryosphere Watch	GCW	thematisch	www.climate-cryosphere.org/en/achievements/cryospherewatch.html
Sustaining Arctic Observing Networks	SAON	regional	www.arcticobserving.org

Tab. 1: Globale, regionale und thematische Netzwerke zur Überwachung und Beobachtung von Permafrostveränderungen und damit verbundenen Klima- und Umweltveränderungen.

Tab. 1 Global, regional and thematic networks for monitoring and observation of permafrost changes and associated climate and environmental changes.

DANKSAGUNG

Wir danken Marcia Phillips und einem anonymen Gutachter für die kritische Durchsicht des Manuskripts und zahlreiche hilfreiche Hinweise und Korrekturen.

Literatur

Andersland, O.B. & Ladanyi, B. (1994): An Introduction to Frozen Ground Engineering.- Chapman & Hall, New York, 1-352.

Bellefleur, G., Riedel, M., Brent, T., Wright, F. & Dallimore, S.R. (2007): Implication of seismic attenuation for gas hydrate resource characterization, Mallik, Mackenzie Delta.- Canada J. Geophys. Res. B: Solid Earth 112(10): art. no. B10311.

Bommer, C., Phillips, M. & Aronson, L.U. (2010): Practical Recommendations for Planning, Constructing and Maintaining Infrastructure in Mountain Permafrost.- Permafrost Periglac. Process. 21: 97-104.

Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., Campbell, D.I. & Balks, M.R. (1998): Short and long term impacts of human disturbances on snow free surfaces in Antarctica.- Polar Record 34: 15-24.

Cheng, G.D. & Li, X. (2003): Constructing the Qinghai-Tibet Railroad: new challenges to Chinese permafrost scientists.- In: M. PHILLIPS (ed), Proceed 8th Internat. Conf. Permafrost: 131-134.

Chuvilin E.M., Yershov E.D., Naletova N.S. & Miklyaeva E.S. (2000): The use of permafrost for the storage of oil and oil products and the burial of toxic industrial wastes in the Arctic.- Polar Record 36: 211-214.

Collett, T.S. & Dallimore, S.R. (2000): Part 3: Oceanic and Permafrost-related Natural Gas Hydrate. In: M.D. MAX (ed), Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments, Springer, Heidelberg, 1-428.

Couture, R., Robinson, S.D. & Burgess, M.M. (2000): Climate change, permafrost degradation, and infrastructure adaptation: preliminary results from a pilot community case study in the Mackenzie valley.- Current Res. 2000-B2, 1-9.

D'Costa, V.M., King, C.E., Kalan, L., Morar, M., Sung, W.W., Schwarz, C., Froese, D., Zazula, G., Calmels, F., Debryne, R., Golding, G.B., Poinar, H.N., & Wright, G.D. (2011). Antibiotic resistance is ancient.- Nature. 2011 Aug 31;477(7365):457-61. doi: 10.1038/nature10388.

Delaloye, R., Perruchoud, E., Avian, M., Kaufmann, V., Bodin, X., Hausmann, H., Ikeda, A., Kääh, A., Kellever-Pirkhauer, A., Krainer, K., Lambiel, C., Mihajlovic, D., Staub, B., Roer, I. & Thibert, E. (2008): Recent Interannual Variations of Rock Glacier Creep in the European Alps.- In: D.L. KANE & K.M. HINKEL (eds), Ninth International Conf. Permafrost, Inst. Northern Engineering, Univ. Alaska Fairbanks, Vol. 1: 343.348.

European Commission (2008): The European Union and the Arctic Region.- COM(2008) 763 final.

Fitzhugh, W.W. & Ward, E.I. (2000): Vikings: The North Atlantic Saga. Smithsonian Institution Press, 1-432.

Friesen, T.M. (1998): Qikiqtaruk - Inuvialuit Archaeology on Herschel Island.- Yukon Heritage, 1-29.

Gruber, S. (2011): Landslides in cold regions: making a science that can be put into practice.- Proceedings Second World Landslide Forum, 3-9 October 2011, Rome, Italy.

Gude, M. & Barsch, D. (2005): Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area (Bavarian Alps, Germany).- Geomorphology 66: 85-93.

Hayley, D.W. & Horne, B. (2008): Rationalizing Climate Change for Design of Structures on Permafrost: A Canadian Perspective.- In: D.L. KANE & K.M. HINKEL (eds), Proceed. 9th International Conf. Permafrost, Univ. Alaska Fairbanks, June 29-July 3, 2008 Inst. Northern Engineering, Univ. Alaska Fairbanks, 681-686.

Hou, G., Xu, C. & Fan, Q. (2010): Three Expansions of Prehistoric Humans towards Northeast Margin of Qinghai-Tibet Plateau and Environmental Change.- Acta Geograph. Sinica, 2010: 531.

Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Ladanyi, B., Larsen, J.O. & Khrustalev, L.N. (2005): Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. Arctic Climate Impact Assessment, ACIA.- In: C. SYMON, L. ARRIS & B. HEAL (eds), Cambridge University Press, Cambridge, 907-944.

Jones, J.S. (1981): State-of-the-art report - Engineering practice in artificial ground freezing.- Eng. Geol. 18:313-326.

Krautblatter, M. & Hauck, C. (2012): Neue Forschungsansätze zur räumlichen und zeitlichen Dynamik des Gebirgspermafrostes und dessen Naturgefahrenpotentials.- Polarforschung 81: 57-68.

Lombardi, S., Altunina, L.K. & Beaubien, S.E. (2006): Preface. Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide.- NATO Sci. Ser. 65: 57-65.

Margesin, R. & Schinner, F. (1999) Biological decontamination of oil spills in cold environments.- J. Chem. Technol. Biotechnol. 74: 381-389.

Melnikov, V.P. & Drozdov, D.S. (2006): Permafrost CO2 storage: The potential for using permafrost terrains for the geological storage of carbon dioxide.- In: S. LOMBARDI, L.K. ALTUNINA & S.E. BEAUBIEN (eds), Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide, NATO Sci. Ser. 65: 67-80.

Mindlin, S.Z., Soina, V.S., Petrova, M.A. & Gorlenko, Zh.M. (2008): Isolation of antibiotic resistance bacterial strains from Eastern Siberia permafrost sediments.- Russian J. Genetics, 44: 27-34.

Muller, SW. (2008): Frozen in Time: Permafrost and Engineering Problems.- In: H.M. FRENCH & F.E. NELSON (eds), Amer. Soc. Civil Eng. Reston, VA, 1-280.



- Ogorodov, S.A., Belova, N.G., Kamalov, A.M., Noskov, A.I., Volobueva, N.N., Grigoriev, M.N., Wetterich, S. & Overduin, P.P. (2010): Storm surges as a forcing factor of coastal erosion in the western and eastern Russian Arctic.- Storm Surges Congress, Hamburg, Germany 13-17 September 2010.
- Ostroumov, V., Siegert, C., Alekseev, A., Demidov, V. & Alekseeva, T. (1998): Permafrost as a frozen geochemical barrier.- In: A.G. LEWKOWICZ & M. ALLARD (eds), Proc. 7th Internat. Conf. Permafrost, Yellowknife, 855-859.
- Riedel, M., Bellefleur, G., Mair, S., Brent, T.A. & Dallimore, S.R. (2009): Acoustic impedance inversion and seismic reflection continuity analysis for delineating gas hydrate resources near the Mallik research sites, Mackenzie Delta, Northwest Territories.- Canada J. Geophys. 74: B125-B137.
- Roer, I., Haeblerli, W., Avian, M., Kaufmann, V., Delaloye, R., Lambiel, C. & Kääh, A. (2008): Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps.- In: D.L. KANE K.M. HINKEL (eds), 9th Internat. Conf. Permafrost, Inst. Northern Eng., Univ. Alaska Fairbanks, Vol 2: 1505-1510.
- 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.
- Sachs, T., Langer, M., Schirrmeyer, L. & Thannheiser D. (2012): Permafrost in den arktischen und subarktischen Tiefländern.- Polarforschung 81: 23-32.
- Sadovsky, A.V. & Dorman Y.A. (1981): The artificial freezing and cooling of soils at construction sites.- Eng. Geol. 18: 327-331.
- Shiklomanov, N.I. (2005): From exploration to systematic investigation: Development of geocryology in 19th-and early-20th-century Russia. Phys. Geograph. 26: 249-263.
- Slaughter, C.W., Racine, C.H., Walker, D.A., Johnson, L.A. & Abele, G. (1990): Use of off-road vehicles and mitigation of effects in Alaska permafrost environments: a review. Environmental Management, 14:63-72.
- Smith, S.L. & Riseborough, D.W. (2010): Modelling the thermal response of permafrost terrain to right-of-way disturbance and climate warming.- Cold Regions Sci. Technol. 60 92-103.
- Tsyrovich, N.A. (1975): The Mechanics of Frozen Ground.- McGraw-Hill, New York, 1-426.
- U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force (2003): Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure. Special Report 01-03, U.S. Arctic Research Commission, Arlington, Virginia.
- Wetterich, S., Overduin, P. & Lantuit, H. (2012): Arktische Küsten im Wandel.- Polarforschung, 11-22.
- Williams, P.J. & Smith, M.W. (1989): The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology.- Cambridge University Press, Cambridge, England, 1-306.
- Zarling, J.P., & Haynes, F.D. (1991): Thermosyphon based designs and applications for foundations built on permafrost.- Proceed. Internat. Arctic Technol. Conf., Soc. Petrol. Eng., Anchorage, AK, 449-458.