

7.3 Permafrostdegradation in Sibirien - Sozio-ökonomische Aspekte

THOMAS OPEL & MATHIAS ULRICH

Permafrostdegradation in Sibirien – Sozio-ökonomische Aspekte: Da große Teile Sibiriens von eisreichem Permafrost unterlagert sind und die Klimaerwärmung in arktischen und subarktischen Regionen besonders ausgeprägt ist, hat der Klimawandel dort besonders starke Folgen für Umwelt und Gesellschaft. Der dauergefrorene Untergrund reagiert empfindlich auf höhere Temperaturen, erwärmt sich zunehmend und taut teilweise auf. Zusätzlich tragen lokale Aktivitäten der Bewohner zur Störung des thermischen Gleichgewichts des Dauerfrostbodens bei. Infolgedessen kommt es vor allem durch das Schmelzen des im Permafrost enthaltenen Grundeises zu Permafrostdegradation. Das führt zu lokalen Absenkungen der Oberflächen, mit weitreichenden Folgen auch für die Infrastruktur, da der Untergrund von z.B. Gebäuden, Verkehrswegen oder Rohrleitungen instabil werden kann und die entsprechenden Bauwerke Schäden erleiden. Weiterhin beeinflussen derartige Landschaftsänderungen die traditionelle Landnutzung (Ackerbau, Viehzucht, Bewässerung) der indigenen Bevölkerung im ländlichen Raum. Da außerdem im und unter dem sibirischen Permafrost große Mengen an Rohstoffen liegen und zunehmend erschlossen werden können, ist auch zukünftig mit weiteren Problemen zu rechnen.

Permafrost degradation in Siberia - Socio-Economic Aspects: As large parts of Siberia are underlain by ice-rich permafrost, global warming has a strong impact on environment and society in this region. Moreover, Arctic and sub-Arctic regions are expected to experience a particular strong impact of global warming. The permanently frozen ground is sensitive to higher temperatures and warms up increasingly. Additionally, local human activities contribute to disturbances of the thermal state of permafrost. Consequently, permafrost starts to degrade predominantly due to melting of the enclosed ground ice. This leads to local surface subsidence, which has also major impacts on human infrastructure. For instance, buildings, transport routes and pipelines may increasingly become unstable and damaged. Moreover, landscape changes influence traditional land use of indigenous people in rural areas (agriculture, livestock breeding, watering). At the same time one can expect further environmental problems in the future as the exploitation of large natural resources in Siberian permafrost areas will increase in the future.

Permafrost in Sibirien

Weite Gebiete Sibiriens sind durch das Vorhandensein von Permafrost gekennzeichnet (Abb. 7.3-1). Permafrost bezeichnet Untergrund, der mindestens über zwei aufeinander folgende Jahre negative Temperaturen aufweist (VAN EVERDINGEN 2005). Der sibirische Permafrost ist während der pleistozänen Kaltzeiten entstanden und erreicht Mächtigkeiten bis zu 1500 Metern. Die Permafrostgebiete umfassen die unterschiedlichsten Landschaften (Steppe, Taiga, Tundra, Gebirge). Ein Kennzeichen vor allem des Permafrosts in den sibirischen Tiefländern und entlang der Polarmeerküste ist der große Anteil von Grundeis im dauergefrorenem Sediment, der überwiegend aus massiven Eiskörpern wie Eiskeilen sowie aus Poreneis und Eislinsen besteht (STRAUSS et al. 2013, ULRICH et al. 2014). Der hohe Eisgehalt der gefrorenen Sedimente macht diese beim Auftauen besonders anfällig.

Die nordeurasischen Permafrostgebiete zählen zu den Regionen mit der weltweit stärksten gemessenen Erwärmung über die letzten Jahrzehnte (Abb. 7.3-2, Fedorov et al. 2014a, MEYER et al. 2015). Basierend auf Klimamodellanalysen wird für die Region prognostiziert, dass sich der bereits eingeleitete Erwärmungsprozess noch deutlich verstärkt und damit große Teile der Arktis und vor allem der Subarktis im Jahr 2100 von tausendem Permafrost betroffen sind (AMAP 2012).

Obwohl die sibirischen Permafrostgebiete von extremen Klima- und Landschaftsbedingungen gekennzeichnet sind, stellen sie einen Lebensraum für mehrere Millionen Menschen dar, die sich auf die unterschiedlichste Art und Weise an diese Bedingungen angepasst haben. Hirten und Nomaden mit traditionellen Lebensweisen sind genauso anzutreffen wie kleinere, meist schrumpfende Siedlungen und prosperierende Großstädte. Obwohl mit bloßem Auge oftmals nur schwer zu erkennen, hat die Existenz von permanent gefrorenem Untergrund weitreichende und komplexe Auswirkungen auf diese Gemeinschaften. Gleichzeitig haben menschliche Aktivitäten einen Einfluss auf den Permafrost. Die Wechselwirkungen zwischen Permafrost und Mensch sind aber sehr komplex. Sie umfassen direkte und indirekte Prozesse mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Größenordnungen und sind daher in ihrer Gesamtheit bisher nur schwer zu fassen. Vor dem Hintergrund der aktuellen, menschlich verstärkten Klimaveränderungen verändern sich diese Wechselwirkungen ständig.

Permafrostdegradation und Thermokarst

Wird das thermische Gleichgewicht des Permafrosts gestört, kommt es insbesondere an der Oberfläche sowie in den Randgebieten zur Degradation des Dau-

erfrostbodens, d.h. einem Rückgang seiner Mächtigkeit und Ausdehnung bis hin zum vollständigen Verschwinden. Dieser Prozess wird in der Regel durch eine Zunahme der sommerlichen Auftautiefe als Folge erhöhter Luft- und Bodentemperaturen eingeleitet. Dafür gibt es natürliche Ursachen größeren Ausmaßes, die schon immer stattgefunden haben, wie z.B. Klimaänderungen, aber auch lokale und regionale Ursachen,

die die isolierende Vegetationsdecke zerstören wie z.B. Erosionsprozesse an Ufern und Hängen, Waldbrände oder Überflutungen. Anthropogene Ursachen erfolgen indirekt z.B. durch den menschlich verstärkten Klimawandel oder direkt infolge von Landnutzung, bei der die obere Permafrostschicht gestört wird, z.B. durch die Errichtung von Gebäuden, Verkehrswegen und Rohrleitungen oder durch landwirtschaftliche Aktivitäten.

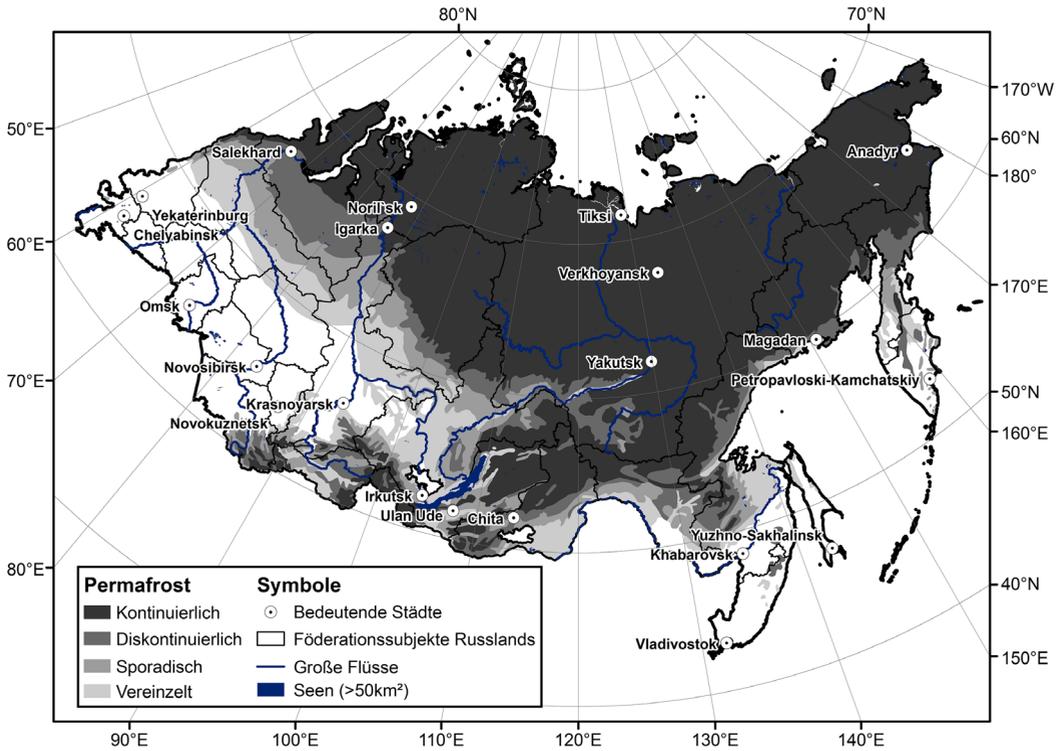


Abb. 7.3-1: Permafrostverbreitung im asiatischen Teil Russlands basierend auf den offiziellen Angaben der Internationalen Permafrost Assoziation (IPA; verändert nach BROWN et al. 2014).

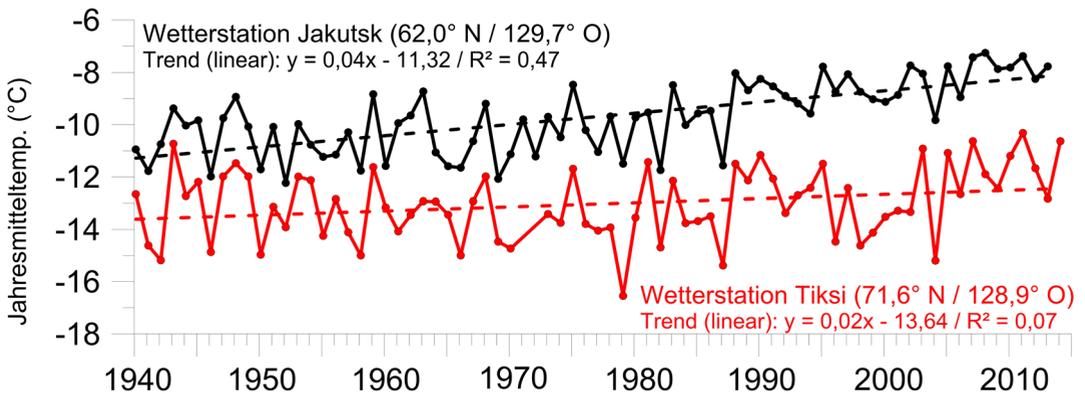


Abb. 7.3-2: Lufttemperaturentwicklung für Tiksi und Jakutsk. Datenquelle: NOAA National Climatic Data Center; <http://www.ncdc.noaa.gov/>.

Die Empfindlichkeit des Permafrostes gegenüber Degradation ist von mehreren Faktoren abhängig, wie dem Oberflächenrelief, der Vegetationsbedeckung, den Bodeneigenschaften, dem Vorhandensein von stehendem Wasser, der sommerlichen Erwärmung oder der Mächtigkeit der winterlichen Schneedecke. Ob und wie stark der Permafrost auf Änderungen dieser Faktoren reagiert, hängt entscheidend vom Grundeisgehalt ab. Weite Teile Sibiriens und Alaskas (ca. 1,4 Mio. km²) werden von sehr eisreichen Sedimenten unterlagert, die größtenteils am Ende des Pleistozäns vor etwa 50.000 bis 20.000 Jahren entstanden. Der hohe Eisgehalt dieser Ablagerungen (bis zu etwa 80 Vol.-%) wird vor allem durch bis zu mehrere Zehnermeter hohe Eiskeile gebildet (Abb. 7.3-3, ULRICH et al. 2014), die sich gleichzeitig mit Ablagerung und Einfrieren des Sediments gebildet haben (SCHIRRMESTER et al. 2013). Auf Grund des hohen Eisgehaltes reagieren diese Sedimente beson-

ders sensibel auf Störungen des thermischen Gleichgewichtes und sind sehr anfällig gegenüber Tauprozessen. Eine große Bedeutung haben dabei große Mengen organischen Kohlenstoffs, die in diesen eisreichen Sedimenten gebunden sind und eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf spielen, wenn sie verstärkt freigesetzt werden (STRAUSS et al. 2013).

Die derzeit verstärkt ablaufende Degradation des Permafrostes ist aus geologischer Sicht nicht einzigartig. Bereits am Ende der letzten Eiszeit vor zirka zehntausend Jahren taute der Permafrost großräumig, was die damaligen Permafrostlandschaften und deren hydrologische Systeme drastisch veränderte. Diese als Thermokarst bezeichneten Prozesse können zyklisch sein und folgen häufig einem bestimmten Ablauf, aus dem sich charakteristische neue Landschaftsformen ergeben (SOLOVIEV 1973). Ein initiales, lokales Austauen von Eiskeilen führt zur Absenkung der Oberfläche und



Abb. 7.3-3: Permafrostablagerungen mit sehr hohen Eisgehalten (hier Eiskeile): (A) Nahe Jakutsk in der Taiga, aufgeschlossen entlang einer Wasserrohrleitung. (B) Steilküste an einem Hauptarm der Lena im Lena-Delta. (Fotos: (A) A. N. Fedorov, (B) T. Opel).

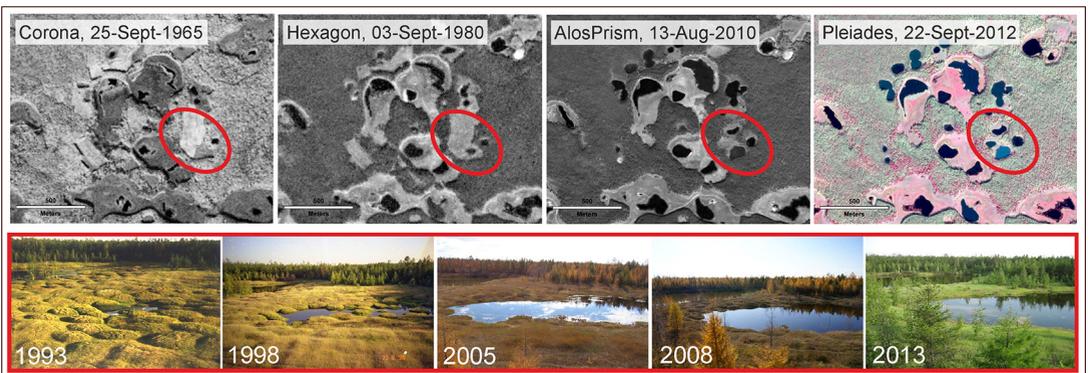


Abb. 7.3-4: Die Zeitreihen verschiedener Satellitendaten (oben) und Fotos (unten) stellen den Landschaftswandel auf Grund rapider Thermokarstprozesse in und um eine zentraljakutische Thermokarstsenke dar. Die Störung des thermischen und hydrologischen Regimes des Permafrostes durch die Landwirtschaft führt vor allem auf den Flächen, die von eisreichen Permafrost unterlagert werden, zu erheblichen Veränderungen der Landschaft innerhalb weniger Jahrzehnte. Die rote Ellipse in der Satellitenbildzeitreihe markiert den Standort der Fotoaufnahmen (Fotos: A. N. Fedorov und M. Ulrich).

zur Bildung sogenannter Thermokarsthügel. Wasser sammelte sich häufig in kleinen Tümpeln zwischen den Hügeln oberhalb der tauenden Eiskeile. Mit dem Zusammenwachsen der sich vergrößernden Tümpel bilden sich größere Thermokarstseen (siehe *Abb. 7.3-4*). Zunehmende Oberflächenabsenkung durch Tauprozesse unter wachsenden Thermokarstseen führt dann zur Bildung großer Becken mit steilen Hängen. Als Folge der Entwässerung großer Thermokarstseen bilden sich zwanzig bis dreißig Meter tiefe Thermokarstsenken (MORGENSTERN et al. 2013). Sie weisen Durchmesser von mehreren Kilometern auf und enthalten häufig kleinere Restseen. Dieser Thermokarstprozess kann mehrere tausend Jahre andauern, aber auch durch landwirtschaftliche Tätigkeit in nur wenigen Jahrzehnten ablaufen (*Abb. 7.3-4*). Allein in den zentraljakutischen Tiefländern existieren etwa 16.000 Thermokarstsenken mit einer Fläche von etwa 440.000 Hektar (BOSIKOV 1991).

Die Faktoren, die gegenwärtig zur Initiierung von Permafrostdegradationsprozessen führen, sind vielfältig und ihre Wechselwirkungen sind bis heute nicht vollständig geklärt. Jegliche Störung der Oberfläche und damit des thermischen Gleichgewichtes des Permafrostes kann jedoch innerhalb weniger Jahre zu intensiven Degradationsprozessen führen. Dabei handelt es sich um einen sich selbst verstärkenden Prozess, der kaum aufzuhalten ist. Im Vergleich zum Ende der letzten Eiszeit zeigt die gegenwärtige Permafrostdegradation deutliche Unterschiede. Zum einen ist die Geschwindigkeit des gegenwärtigen Klimawandels einzigartig, zum anderen werden die Folgen durch erhöhte Landnutzung verstärkt. Dies ist auch auf die Bevölkerungszunahme in Permafrostgebieten zurückzuführen. Deshalb kann die aktuelle Permafrostdegradation als ein einzigartiger Prozess betrachtet werden, der häufig sehr rasch und teilweise katastrophal verläuft. Ein gutes Beispiel sind die 2014 in Nordwestsibirien entdeckten Erdfälle. Die sogenannten »Yamal-Krater« sind mit großer Wahrscheinlichkeit durch plötzliche Ausgasungen des Treibhausgases Methan entstanden, das im Permafrost gespeichert war und durch zunehmende Tauprozesse im Untergrund freigesetzt wurde (LEIBMAN et al. 2014). Auch in Gebirgsregionen wird die Zunahme von Hangrutschungen und Felsstürzen beobachtet. Da Permafrost wie eine Art Zement für die meisten oberflächennahen Gesteine und Sedimente wirkt, führt das Tauen des Permafrostes dort zum Aufheben des Zusammenhalts großer Felsmassive. Entlang der Küsten kommt es durch tauenden Permafrost zur Zunahme der Küstenerosion. Hier werden Tauprozesse durch die erodierende Aktivität des Wassers noch verstärkt und führen zur Zerstörung großer Landabschnitte, die auch die Infrastruktur der Menschen bedroht.

Wechselwirkungen von Permafrost und Infrastruktur

Etwa die Hälfte der Bevölkerung der Arktis und Subarktis lebt in den russischen Permafrostgebieten, weswegen die Erwärmung des Permafrostes hier schwerwiegende sozioökonomische Konsequenzen vor allem in Bezug auf die Infrastruktur haben kann. Gleichzeitig ist in diesen Regionen die menschliche Einwirkung auf den Permafrost besonders bedeutend.

Die Erschließung der sibirischen Permafrostgebiete durch Siedlungen, Straßen, Eisenbahnstrecken und Rohrleitungen galt und gilt in erster Linie den im gefrorenen Untergrund gespeicherten Bodenschätzen. Obwohl nur etwa 5% der russischen Bevölkerung in diesen Gebieten lebt, steuert diese Region etwa ein Fünftel des Bruttoinlandsprodukts als auch der russischen Exporte bei (STRELETSKIY et al. 2012). Relativ zeitig erkannte man, dass die Dauerfrostregion reich an Erdgas, Erdöl, Erzen, Kohle, Edelmetallen und Diamanten ist. Sibirien ist eine der Regionen mit den weltweit größten Vorkommen an energieliefernden und mineralischen Rohstoffen. So kommen etwa 25% der globalen Gasproduktion und 10% der weltweiten Ölproduktion allein aus den nordwestsibirischen Lagerstätten (DOBRETSOV et al. 2007). Der Abbau der Rohstoffe bedeutet jedoch häufig erhebliche Störungen für das Ökosystem und den Verlust von Lebensräumen einheimischer Bevölkerungsgruppen. Vor allem die Exploration und Entwicklung großer Gasförderfelder führt zur Zerstörung ausgedehnter Tundrengebiete und damit der traditionell genutzten Rentier-Weideflächen.

Die gegenwärtige globale Erwärmung stellt aber auch eine allgegenwärtige Gefährdung für auf Permafrost gebaute Infrastruktur dar. Mit der Expansion des modernen Russland nach Sibirien und Fernost (*Abb. 7.3-1*) begann der Fortschritt beim Bauen in und auf dem gefrorenen Untergrund (LANTUIT & SCHIRRMESTER 2011). Große Erfahrungen und umfangreiches Spezialwissen sammelten russische Ingenieure zum Beispiel beim Bau der Transsibirischen Eisenbahn am Ende des 19. Jh. und danach durch den Bau unzähliger Brücken, Dämme und Tunnel (MULLER 2008). Die Vielfalt an geologischen und geomorphologischen Parametern unter verschiedensten Landschaftstypen (z.B. Tundra, Taiga, Sümpfe, Flusstäler, Gebirge) sowie das Auftreten verschiedener Grundeistypen (z.B. massive Eiskörper, Poreneis, Eislinsen) sind in Gänze schwer zu erfassen. Zusammen mit den extremen Wetter- und Temperaturbedingungen sind diese Gegebenheiten auch heute nur schwer beherrschbar. Zwar forderte man schon Anfang des 20. Jh. die Belüftung der Untergeschosse von Gebäuden, um den Permafrost vor der Gebäudewärme zu schützen, doch der heu-

te allgegenwärtige Bau von Gebäuden auf Pfählen in Permafrostgebieten (Abb. 7.3-5) wurde erst 1956 von dem russischen Ingenieur Mikhail Kim entworfen (STRELETSKIY et al. 2015). Die Erwärmung und das Auftauen des gefrorenen Untergrundes sowie die Zunahme der sommerlichen Auftauschicht wurden zuvor bei der Bauplanung häufig nicht in Betracht gezogen. Dies kann aber zur gefährlichen Destabilisierung des Fundamentes und damit zu Deformationen an Gebäuden und letztendlich zum Zusammenbruch führen. Nicht selten kann man Bauwerke in unterschiedlichen Graden der Zerstörung in sibirischen Städten aber auch in Alaska und im Norden Kanadas sehen. In verschiedenen Städten der russischen Arktis sind nach STRELETSKIY et al. (2015) bis zu 80% der Gebäude von Zerstörung gekennzeichnet (Abb. 7.3-5), mit stark zunehmender Tendenz in den letzten Jahren. Auch der Pfahlbau stößt an seine Grenzen, vor allem in Gebieten mit »warmem« Permafrost, d.h. mit Bodentemperaturen nur knapp unter 0 °C. Zudem wurde bei der Planung das Ausmaß der heutigen starken Erwärmung oft nicht ausreichend berücksichtigt und die Gründung auf Pfähle nicht entsprechend tief durchgeführt.

Rohrleitungssysteme für den Transport von Wärme, Wasser, Erdöl und Erdgas sind andere Bauwerke, die teilweise große Wechselwirkungen mit dem unterlagernden Permafrost aufweisen (siehe z.B. Abb. 7.3-3A). In der Regel können Rohrleitungen auf Grund starker Eigenwärme sowie vertikaler Deformationskräfte im Permafrost auch über lange Strecken nur oberirdisch gebaut werden. Allein in Russland existiert ein über mehr als 71.000 km weit verzweigtes Netz von Öl- und Gas-Rohrleitungen, wobei weitere geplant sind (STRELETSKIY et al. 2015). Deformationen von Rohrleitungen infolge von Frosthebungs- und -senkungsprozessen, Schmelzen von Grundeis, Vernässung oder Thermokarst können katastrophale Auswirkungen haben, wenn zum Beispiel Öl an Lecks austritt und weite Landstriche und die sensiblen arktischen Ökosysteme nachhaltig verseucht werden.

Wie komplex die Konstruktion von Rohrleitungen ist, zeigt die Tatsache, dass allein in der westsibirischen Yamburg-Region zwischen 2007 und 2009 ungefähr 8.000 Unterstützungspfeiler nachjustiert werden mussten. Etwa 20% der Rohrleitungen in Westsibirien zeigen Deformationen, wenn auch bei weitem nicht



Abb. 7.3-5: Permafrost und Infrastruktur: (A) Durch Permafrostdegradation deformierte Gebäude neben neuen permafrostgerecht gebauten Gebäuden in Jakutsk, (B) Gebäude auf Pfählen zur Kühlung des Permafrostes, (C) Durch Permafrostdegradation deformiertes und zerstörtes Gebäude in Tiksi, (D) Thermosyphons zur Kühlung eines Wasserdamms in unmittelbarer Nähe zum modernen Krankenhaus von Jakutsk (Fotos: (A, D) M. Ulrich, (B, C) T. Opel).

alle auf Permafrostdegradation zurückzuführen sind. Dementsprechend kommt es allein in dieser Region zu 35.000 Störfällen pro Jahr (STRELETSKIY et al. 2015). Wenn sich die Entwicklung von Öl- und Gasgewinnung fortsetzt oder verstärkt, ist allein wegen des Alterns der Infrastruktur und der prognostizierten Klimaänderungen von einer größeren Anzahl von Havarien mit zunehmenden negativen Einflüssen auf die Ökosysteme auszugehen.

Ein weiteres Problem stellt der Bau von Straßen und Eisenbahnlinien in Permafrostgebieten dar. Neben schmelzendem Grundeis infolge von Störungen der isolierenden Vegetations- und Bodenschichten sowie massiver Umverteilung des ebenfalls isolierenden Winterschnees tragen hier vor allem die jährlichen Gefrier- und Tauzyklen und damit einhergehende Bodenbewegungen und -hebungen entscheidend zur Deformation von Straßen und Verkehrswegen bei. Ungefähr 20% der Straßen im Osten Russlands wie auch der Baikal-Amur-Eisenbahn weisen Deformationen auf (STRELETSKIY et al. 2012).

Solche Zerstörungen sind vor allem auf langen Strecken schwer zu vermeiden und die Instandhaltung der Verkehrswege in Permafrostgebieten bedarf demzufolge eines immensen finanziellen Aufwands. Straßenbetten werden häufig erhöht gebaut, um den Abfluss von Wasser zu ermöglichen und die Auswirkungen frostbedingter Bodenbewegung zu minimieren. Da der Permafrost als Wasserstauer fungiert, reichen kleinere Regenfälle aus, um nicht asphaltierte Straßen und Wege in tiefe Schlammgruben zu verwandeln und unpassierbar zu machen. Andererseits ist auf Grund der Auswirkungen frostbedingter Bodenbewegung das Asphaltieren von Straßen in Permafrostgebieten nicht zweckmäßig. Einige Großbauprojekte der letzten Jahrzehnte konnten nur durch den Einsatz von Thermosyphons realisiert werden. Thermosyphons sind passive, meist säulenförmige Konstruktionen (Abb. 7.3-5d), die einen Wärmeaustausch durch die Nutzung natürlicher Konvektion in einem geschlossenen Flüssigkeitskreislauf ermöglichen und damit zur Kühlung des Permafrostes beitragen.

Die Folgen unsachgemäßer Bebauung und Errichtung von Infrastruktur sind heute vielerorts und in vielen Facetten sichtbar (Abb. 7.3-5). Zum Beispiel wurde Jakutsk, die Hauptstadt Jakutiens (Abb. 7.3-1), auf Grund der durch Permafrostdegradation verursachten Schäden im Jahre 1998 als Naturkatastrophengebiet klassifiziert (NELSON et al. 2002), in dem erhebliche Investitionen erforderlich sind, um katastrophale Folgen zu verhindern, die sich aus weiteren Schäden an Gebäuden und anderer Infrastruktur ergeben.

Durch die komplexen Wechselbeziehungen zwischen Permafrost und Mensch kommt es in der Regel zu Verzögerungen zwischen dem Entstehen und dem Erkennen einer Gefährdung sowie der anschließenden Entscheidungsfindung und Umsetzung einer Gegenstrategie. Deshalb wurden in den letzten Jahren Richtlinien für das Bauen auf und im Permafrost entwickelt, die vor allem die mit der globalen Erwärmung einhergehenden geotechnischen Veränderungen des sich erwärmenden Permafrostes zum Inhalt haben.

Die Kosten für die Erhaltung der Infrastruktur infolge des Klimawandels in den Permafrostgebieten sind sehr hoch. Es ist von Kosten in Milliardenhöhe pro Jahr auszugehen, auch wenn konkrete Abschätzungen schwierig sind. Allein die Kosten für Erhaltungsmaßnahmen an Rohrleitungssystemen in den russischen Permafrostgebieten belaufen sich auf mehr als 1,5 Mrd. Dollar pro Jahr (STRELETSKIY et al. 2015).

Interaktion zwischen Permafrost und Mensch in der Geschichte und der Gegenwart

Trotz ihrer scheinbar lebensfeindlichen Umweltbedingungen wurden Permafrostlandschaften schon vor Jahrtausenden vom Menschen besiedelt. Indigene Urvölker hatten sich auf die saisonal wechselnden Gefrier- und Tauzyklen der oberflächlichen Auftauzone eingestellt. Schon die frühen Siedler nutzen den Permafrost, um ihre Lebensmittel zu lagern und die Stabilität ihrer Behausungen zu sichern. Die Tiefe der Auftauzone sowie hydrologische und geomorphologische Verhältnisse bestimmen auch die Art und Zusammensetzung der Vegetationsgesellschaften. Die breitengrad- und klimabedingte Zonierung (Taiga, Waldtundra, Tundra, Kältewüste) führte bei Umweltveränderungen zur Verschiebung von Lebensräumen (z.B. der Baumgrenze) und auch zur veränderten Verfügbarkeit von Nutzpflanzen (z.B. Getreide und Gräser zur Heugewinnung). In der sibirischen Arktis leben nomadisierende Jäger und Sammler (z.B. Nentsen, Ewenken, Tschuktschen), die Rentiere domestizierten, um von deren Zucht zu leben. Dagegen siedeln im zentralen und vor allem im östlichen Teil Sibiriens Jakuten, die vor ca. 800 Jahren von Süden her einwanderten und entlang der breiten Flussterrassen der Lena und innerhalb der Taigawälder in zahlreichen fleckenhaft verbreiteten Thermokarstsenken fruchtbare Grasländer vorfanden. Diese dienten ihnen als natürliche Weiden und Futterressourcen für ihr Vieh (Abb. 7.3-6). Die Besiedlung und Nutzung der sibirischen Permafrostlandschaften war auch eng mit der Kultur der indigenen Völker verknüpft. Zum Beispiel wurden die Graslandschaften innerhalb der Thermokarstsenken von den Jakuten als heilig angesehen und durften nicht unnötig gestört werden. Aus diesem

Grund wurde es in früheren Zeiten vorgezogen nicht durch diese Senken, sondern durch die angrenzende Taiga zu reisen (vgl. CRATE 2008). Das Leben der nord-sibirischen Nomadenvölker wurde wiederum ganz von der Mobilität und dem Wanderungsverhalten der Rentiere und damit dem jahreszeitlichen Wechsel von Auftauen und Gefrieren der arktischen Tundra bestimmt.

Inwiefern sich indigene Urvölker an sich verändernde Lebensbedingungen in Permafrostlandschaften angepasst haben und heute anpassen und wie groß ihr Einfluss auf Landschaftsveränderungen war und ist, sind derzeit zentrale Fragen der Permafrostforschung. Die Jakuten haben z.B. in der Vergangenheit immer wieder versucht, die Verfügbarkeit von Wasser zu beeinflussen, um ihre auf Pferde- und Rinderzucht gestützte Subsistenzwirtschaft zu optimieren. Durch die Drainage von Seen und Feuchtgebieten wurde versucht, die nutzbare Heufläche zu erweitern oder unter Verwendung verschiedenster Dämme das Wasser während der Trockenzeiten zurückzuhalten. Diese und andere menschliche Aktivitäten, die auf den Permafrost im Untergrund einwirken, sind bis heute einer der Hauptantriebskräfte des Landschaftswandels

in Zentraljakutien (vgl. CRATE 2008). Dazu trug auch die Intensivierung und Extensivierung der Landwirtschaft zu Beginn und Mitte des 20. Jahrhunderts bei. Die zunehmende Rodung der borealen Wälder und die anschließende Kultivierung dieser Flächen führte zum Teil innerhalb weniger Jahrzehnte zu rapiden Tauprozessen, zu erheblichen Veränderungen des Reliefs und zur Bildung von Thermokarstseen (Abb. 7.3-4; vgl. auch FEDOROV et al. 2014b), mit der Folge, dass diese Agrarflächen aufgegeben werden mussten. Auch in den nördlichen Tundrangebieten, wo die Rentierwirtschaft einen entscheidenden Teil der Landnutzung repräsentiert, werden die Folgen ihrer Intensivierung zunehmend deutlich. Zum Beispiel, wurde für die Halbinsel Yamal bereits in den 1990er Jahren geschätzt, dass die Anzahl der Rentiere von etwa 180.000 Individuen bereits dem Doppelten des Optimums für die Region entspricht (FORBES 1999). Das extensive Grasens und Zertrampeln der Oberfläche durch die Tiere hat einen enormen Einfluss auf die Zusammensetzung und Produktivität der Tundravegetation bis hin zum Verlust der isolierenden Pflanzendecke. Damit einhergehende Veränderungen des Rückstrahlungsvermögens der



Abb. 7.3-6: Interaktion von Mensch und Permafrost in Jakutien: (A) Mechanisierung traditioneller Heuwirtschaft in einer Thermokarstsenke, (B) Flächen zur Heugewinnung werden unbrauchbar durch zunehmende Überflutung der Grasländer, (C) Initialer Thermokarst und Thermokarsthügel in einem zentraljakutischen Dorf, (D) Trocknung des Bodens nach Überflutung, um Tauprozessen entgegen zu wirken (Fotos: (A) M. Ulrich, (B, D) S. Crate, (C) A.N. Fedorov).

Oberflächen (Albedo) können zur Erwärmung und Degradation des Permafrostes beitragen. Eine Folge davon ist, dass auf Grund großflächiger Thermokarstprozesse traditionelle Weidegründe der Rentiernomaden nicht mehr nutzbar sind.

Darüber hinaus hat die Degradation des Permafrostes Einfluss auf weitere Bereiche des alltäglichen Lebens, vor allem in der russischen Arktis und Subarktis (Abb. 7.3-6). Wegen Ihrer Abgeschlossenheit und fehlender Anschlussmöglichkeiten an das überregionale Straßen- oder Eisenbahnnetz sind viele kleinere Siedlungen mit Kraftfahrzeugen nur auf Winterstraßen, d.h. zugefrorenen Flüssen oder temporären, verfestigten Pisten aus Schnee und Eis, zu erreichen. Im Sommer sind sie nur per Boot erreichbar oder weitgehend von der Außenwelt abgeschnitten. Kürzere Betriebszeiten der Winterstraßen infolge von Erwärmung, tauendem Permafrost und kürzerer Eisbedeckung der Flüsse haben einen massiven Einfluss auf die dort lebende Bevölkerung und die ansässige Wirtschaft. Auch die Infrastruktur von Flughäfen, insbesondere Start- und Landebahnen, wird durch Frosthub- und Setzungsprozesse in Mitleidenschaft gezogen und schränkt die Erreichbarkeit entfernter Siedlungen weiter ein. Geländegängige Kettenfahrzeuge erhöhen die Erreichbarkeit das ganze Jahr über, verursachen aber im Sommer massive Störungen der isolierenden Vegetationsbedeckung, was zur Einleitung von Tauprozessen führt.

Die traditionellen im gefrorenen Untergrund angelegten Eiskeller können auf Grund zunehmender Permafrosttemperaturen häufig nicht mehr die notwendigen Temperaturen halten, um Lebensmittel (v.a. Fleisch und Fisch) langfristig gefroren zu lagern und werden instabil und brechen zusammen. Auch Grabstätten die nicht tief genug im Permafrost angelegt wurden, geraten nun unter den Einfluss saisonaler Tau- und Gefrierzyklen, was stellenweise zu Frosthebungen und damit zur Zerstörung der Grabstätten führen kann. So musste z.B. im Jahr 2011 auf der Kotelnj-Insel der Leichnam des Polarforschers Herrmann von Walther umgebettet werden, da die ursprüngliche Grabstätte instabil wurde.

Die Folgen der Erwärmung Sibiriens werden von der einheimischen Bevölkerung zunehmend verspürt. Ethnographische Langzeitstudien in indigenen Gemeinschaften der zentraljakutischen Permafrostgebiete berichten von zahlreichen Umweltveränderungen im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung (z.B. CRATE 2008). Die bedeutendsten beobachteten Veränderungen beziehen sich auf drastische Schwankungen der Lufttemperatur. Die Winter werden als milder empfunden, aber die Sommer als kälter. Die hydrologischen Bedingungen werden als schlechter empfunden, mit direkten Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Nut-

zung und den Fischfang. Es gibt mehr Überflutungen und Starkregenereignisse, die Landoberfläche wird generell feuchter (Abb. 7.3-6). Lokal werden von den Einheimischen häufig auch Veränderungen der biologischen Vielfalt (Biodiversität) genannt. Viele wilde Tiere sind verschwunden, dafür gibt es nun mehr Insekten. Viele Bäume sterben ab, als Folge von Waldbränden, Insektenbefall, permanenten Überschwemmungen und Versumpfung.

Ausblick

Letztendlich gibt es nur wenig positive Aspekte der Permafrostdegradation. Die Auswirkungen der klimabedingten und anthropogenen Landschaftsveränderungen sind sowohl in ökonomischen als auch in sozialen Maßstäben schwer umfassend zu beurteilen. Inwiefern ein verbesserter Zugang zu natürlichen Rohstoffen und Bodenschätzen in einigen arktischen Regionen und den noch heute von Permafrost unterlagerten Schelfgebieten die Folgen der zunehmenden Permafrostdegradation kompensieren kann, ist fraglich, da die Veränderungen im Permafrost auch die Bedingungen für Rohstoffgewinnung und Infrastruktur erschweren. Klar ist jedoch, dass die mit dem Tauen des Permafrostes zusammenhängenden Landschaftsveränderungen vor allem die Lebensbedingungen der ländlichen, meist indigenen Bevölkerung verschlechtern. Die Folge daraus ist, dass traditionelle Lebensweisen aufgegeben werden müssen und es zunehmend zu Migration in die Städte kommt. Die komplexe Natur der Wechselbeziehungen zwischen Permafrost, Klima und Mensch wird deshalb auch zukünftig ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt sein müssen.

Danksagung

Wir danken Lutz Schirmeister (Alfred-Wegener-Institut Potsdam), einem anonymen Gutachter und den Herausgebern für die kritische Durchsicht des Manuskripts und zahlreiche Hinweise und Korrekturen. Die Autoren wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt (DFG Förderungen: OP 217/2-1 und UL 426/1-1).

Literatur:

- AMAP (2012): Arctic Climate Issues 2011: Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011 Overview Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo. 97 pp.
- BOSIKOV, N. P. (1991): Evolution of alases in Central Yakutia. Melnikov Permafrost Institute, Siberian Division. Russian Academy of Science, Yakutsk, 128 pp. (In Russisch).
- BROWN, J., FERRIANS, O., HEGINBOTTOM, J. A. & E. MELNIKOV (2014): Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center.
- CRATE, S. (2008): Gone the bull of winter? Grappling with the cultural implications of and anthropology's role(s) in global climate change. *Current Anthropology*, 49 (4), 569-595.
- DOBRETSOV, N. L., KANYGIN, A. V. & A. E. KONTOROVICH (2007): Economics and environment as factors of sus-

- tainable development of Siberian mineral resources. In: Briskey, J. A. & K. J. Schulz (eds.), Proceedings for a Workshop on Deposit Modeling, Mineral Resource Assessment, and Their Role in Sustainable Development: U.S. Geological Survey Circular 1294. 43-54.
- FEDOROV, A. N., IVANOVA, R. N., PARK, P., HIYAMA, T. & Y. IJIMA (2014a): Recent air temperature changes in the permafrost landscapes of northeastern Eurasia. *Polar Science* 8, 114-128.
- FEDOROV, A. N., GAVRILIEV, P. P., KONSTANTINOV, P. Y., HIYAMA, T., IJIMA, Y. & G. IWAHANA (2014b): Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia. *Ecology*, 7 (2), 188-196.
- FORBES, B. C. (1999): Land use and climate change on the Yamal Peninsula of north-west Siberia: some ecological and socio-economic implications. *Polar Research* 18 (2), 367-373.
- LANTUIT, H. & L. SCHIRRMESTER (2011): Permafrost und Mensch. *Polarforschung* 81 (1), 69-75.
- LEIBMAN, M. O., KIZYAKOV, A. I., PLEKHANOV, A. V. & I. D. STRELETSKAYA (2014): New permafrost feature - Deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations. *Geography, Environment, Sustainability* 4, 68-80.
- MEYER, H., OPEL, T., LAEPPLER, T., DEREVIAGIN, A., HOFFMANN, K. & N. WERNER (2015): Long-term winter warming trend in the Siberian Arctic during the mid- to late Holocene. *Nature Geoscience* 8, 122-125.
- MORGENSTERN, A., ULRICH, M., GÜNTHER, F., ROESSLER, S., FEDOROVA, I. V., RUDAYA, N. A., WETTERICH, S., BOIKE, J. & L. SCHIRRMESTER (2013): Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study. *Geomorphology*, 201, 363-379.
- MULLER, S. W. (2008): Frozen in Time: Permafrost and Engineering Problems. In: French, H. M. & F. E. Nelson (eds.), *Amer. Soc. Civil Eng. Reston, VA*, 1-280.
- NELSON, F. E., ANISIMOV, O. A. & N. I. SHIKLOMANOV (2002): Climate change and hazard zonation in the Circum-Arctic permafrost regions. *Natural Hazards* 26, 203-225.
- SCHIRRMESTER, L., FROESE, D., TUMSKOY, V., GROSSE, G. & S. WETTERICH (2013): Yedoma: Late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of Beringia. In: *The Encyclopedia of Quaternary Science* 2nd edition. Elias, S. A. (Ed.). Elsevier, Amsterdam 3; 542-552.
- SOLOVIEV, P. A. (1973): Thermokarst phenomena and landforms due to frost heaving in central Yakutia. *Biuletyn Peryglacjalny*, 23, 135-155.
- STRAUSS, J., SCHIRRMESTER, L., GROSSE, G., WETTERICH, S., ULRICH, M., HERZSCHUH, U. & H.-W. HUBBERTEN (2013): The deep permafrost carbon pool of the Yedoma region in Siberia and Alaska. *Geophysical Research Letters* 40 (23), 6165-6170.
- STRELETSKIY, D., SHIKLOMANOV, N. & E. HATLEBERG (2012): Infrastructure and a changing climate in the Russian Arctic: A geographic impact assessment. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost. Hinkel, K. M. (Ed.). The Northern Publisher, Salekhard, Russia. 407-412.
- STRELETSKIY, D., ANISIMOV, O. & A. VASILIEV (2015): Permafrost Degradation. In: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Haeblerli, W., Whiteman, C. & Shroder Jr., J. F. (Eds.). Elsevier, Amsterdam. 303-344.
- ULRICH, M., GROSSE, G., STRAUSS, J. & L. SCHIRRMESTER (2014) Quantifying wedge-ice volumes in Yedoma and thermokarst-basin deposits. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25 (3), 151-161.
- VAN EVERDINGEN, R. (ed.) (1998): revised 2005. *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center.

Kontakt:

Dr. Thomas Opel
 Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für
 Polar und Meeresforschung, Sektion Periglazialforschung
 thomas.opel@awi.de
 Dr. Mathias Ulrich
 Universität Leipzig, Institut für Geographie
 mathias.ulrich@uni-leipzig.de

Opel, Th. & M. Ulrich (2015): *Permafrostdegradation in Sibirien - Sozio-ökonomische Aspekte*: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp.261-270. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.40