

Böden in Permafrostgebieten der Arktis als Kohlenstoffsенke und Kohlenstoffquelle

von Sebastian Zubrzycki¹, Lars Kutzbach¹ und Eva-Maria Pfeiffer¹

Kurzfassung: Permafrostbeeinflusste Böden haben über das Quartär beträchtliche Vorräte an organischer Substanz akkumuliert. Das Gebiet, das Permafrost beeinflusste Böden bedecken, ist über 8,6 Millionen km² groß, was ca. 27 % der Landmasse nördlich des fünfzigsten Breitengrades entspricht. Diese beiden Fakten lassen diese Böden und ihre großen oberflächennah gespeicherten Mengen organischer Substanz zu einer der wichtigsten Größen der Kryosphäre innerhalb des Klimasystems werden. Die kryopedogenetischen Prozesse, welche zur Ausbildung dieser besonderen Böden führen, und die an das arktische Klima angepasste Vegetation haben die hohe Akkumulation von organischer Substanz so sehr begünstigt, dass heute bis zu 1024 Pg (1 PG = 10¹⁵ g = 1 Gt) bodeneigenen organischen Kohlenstoffs in den obersten 3 m unter der Bodenoberfläche gespeichert vorliegen. Die beobachtbare fortschreitende Klimaänderung mit einer starken Temperaturerhöhung und einer Niederschlagsverschiebung innerhalb arktischer Gebiete wird die Eigenschaften der permafrostbeeinflussten Böden grundlegend ändern. Als wesentliche Folge dieser Änderungen werden höhere Umsetzungs- und Mineralisationsraten der organischen Substanz und damit verbunden eine höhere Freisetzung von klimarelevanten Spurengasen in die Atmosphäre erwartet. Aufgrund dieser komplexen Effekte stellen die Permafrostgebiete mit ihren besonderen Böden ein wichtiges – auch für die Politik und Gesellschaft relevantes – mögliches Kippelement des globalen Klimasystems dar. Die Frage, ob die Permafrostgebiete heute bereits als Kohlenstoffquellen wirken oder immer noch Kohlenstoff akkumulieren, ist bislang unklar und ist regional unterschiedlich zu bewerten. Eine größere Anzahl an Studien – vor allem in den bisher noch nicht ausreichend repräsentativ untersuchten Regionen Sibiriens – könnte sowohl zu einer robusteren Abschätzung des Vorrats an gespeichertem organischem Kohlenstoff in den Böden der Permafrostgebiete als auch zu einer Klärung der Quellen- und Senkenfunktion der permafrostbeeinflussten Böden beitragen.

Abstract: Permafrost-affected soils have accumulated enormous pools of organic matter during the Quaternary Period. The area occupied by permafrost-affected soils amounts to more than 8.6 million km², which is about 27 % of all land areas north 50 °N. These facts enable permafrost-affected soil to be considered as one of the most important cryosphere elements within the climate system. Due to the cryopedogenic processes that form these particular soils and the overlying vegetation that is adapted to the arctic climate, organic matter has accumulated to the extent that today there might be up to 1024 Pg (1 PG = 10¹⁵ g = 1 Gt) of soil organic carbon stored within the uppermost three meters of ground. Progressive climate change has already been observed, and with projected polar amplification, permafrost-affected soils will undergo fundamental property changes. As an essential effect of these changes, higher turnover and mineralization rates of the organic matter are expected to result in increased climate-relevant trace gas release to the atmosphere. Therefore, permafrost regions with their particular soils are likely to trigger an important tipping point of the global climate system, with additional political and social implications.

The question of whether permafrost regions are already a carbon source or even still accumulate carbon could not be satisfactorily answered until today. An increased focus on this subject, especially in underrepresented Siberian regions, could contribute to a more robust estimation of the soil organic carbon pool of permafrost regions as well as to a better understanding of the carbon sink and source functions of permafrost-affected soils.

EINFÜHRUNG

In weiten Gebieten der hohen Breiten in Nordeuropa, in Grönland, Kanada, Alaska und Russland konnte im Quartär eine besondere Gruppe von Böden entstehen, deren Diversität hauptsächlich durch spezielle kryopedogenetische Prozesse innerhalb der Pedosphäre begründet ist. Zu den wichtigsten kryopedogenetischen Prozessen zählen die kryogene Verwitterung (Frostspaltung), Eisseggregation und Eisakkumulation (durch verstärktes Anfrieren von Wasser an bestehende Eislinen), Kryoturbation (Durchmischung des Bodens durch wiederholtes Gefrieren und Tauen und damit verbundenen Dehnungs- und Kontraktionsprozessen), Kryometamorphose (eisbedingte Umwandlung von Bodenstrukturen), Gelisolifikation (langsames, flächenhaftes Abwärtsfließen des Bodenmaterials der Auftauschicht an Hängen ab einer Neigung von 2°), Frosthebung, Frostsortierung (Materialverlagerung bedingt durch die Volumenzunahme beim Gefrieren von Wasser) und Frostspaltenbildung bedingt durch die Kontraktion des gefrorenen Bodens bei sehr niedrigen Temperaturen (Abb. 1).

Die von Permafrost unterlagerten Gebiete der nördlichen Hemisphäre erstrecken sich über knapp 23 Millionen km², was ungefähr einem Viertel ihrer gesamten Festlandfläche entspricht (BARANOV 1959, SHI 1988, ZHANG 1999, 2003, FRENCH 2007). Dabei werden Gebiete als Permafrostgebiete bezeichnet, wenn ihre Böden und Sedimente in zwei aufeinander folgenden Jahren kontinuierlich Temperaturen von 0 °C oder tiefer im Untergrund aufweisen (VAN EVERDINGEN 1998) (Abb. 2A). Bei dieser Definition kann das Bodenwasser, wenn es viele gelöste Stoffe enthält oder in Feinporen gehalten wird, auch flüssig im Permafrost vorliegen. Zur eindeutigen Abgrenzung des Permafrostes und des darüber liegenden Supra-Permafrostes wurde der Begriff cryotic (Temperatur <0 °C) eingeführt (FRENCH 2007). Neben dieser auf das Bodentemperaturregime fokussierenden Betrachtungsweise, welche die Grenze des dauerhaft unter 0 °C kalten Bodens als so genannte Permafrosttafel benennt, gibt es noch eine weitere Betrachtungsweise, die auf den Tau-Gefrier-Zustand fokussiert. Diese unterscheidet im oberen Bodenbereich die saisonale Auftauschicht (*active layer*) und den darunter liegenden permanent gefrorenen Boden (Abb. 2B).

Eine räumliche Differenzierung der Permafrostgebiete erfolgt nach dem Anteil der durch Permafrost unterlagerten Flächen an der Gesamtfläche eines Gebietes in kontinuierlichen, diskontinuierlichen, sporadischen und isolierten Permafrost (vgl. SCHIRRMAYER et al. 2012). Neben den hohen Breiten der Nordhemisphäre kommen Permafrost und permafrostbeeinflusste Böden auch in den Gebirgen der Erde (vgl. KRAUT-

¹ Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg, Allende-Platz 2, D-20146 Hamburg, <S.Zubrzycki@ifb.uni-hamburg.de>

Manuskript eingereicht 30. Januar 2012; überarbeitet zum Druck angenommen am 12. März 2012

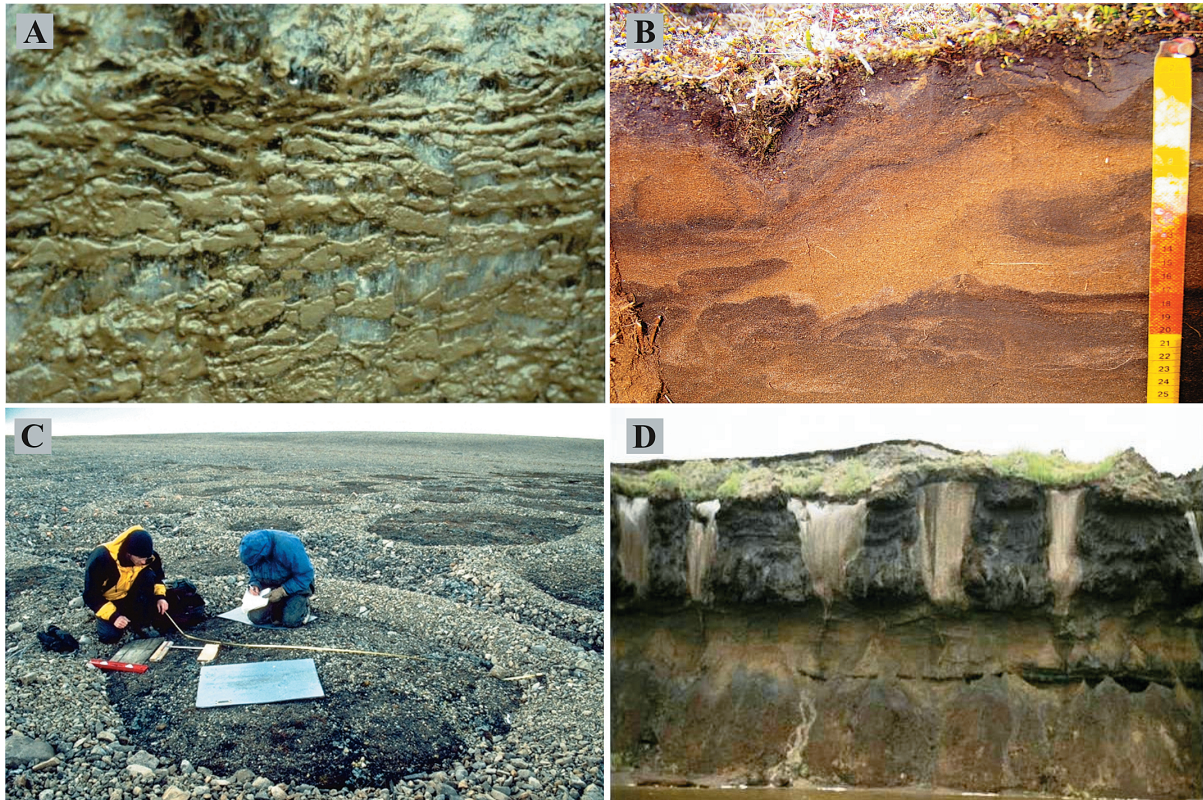


Abb. 1: Ergebnisse kryopedogener Prozesse im Permafrost. A = Segregationseis, Lena-Delta, Sibirien 2007. B = Kryoturbation im Oberboden eines Gelisols (Typic Psammenturbel), Arga-Komplex, nordwestliches Lena-Delta, Sibirien 2009. C = Sortierte Kreise als eine Form von Frostmustern, die durch Frostsorrierung entstehen, Taimyr-Halbinsel, Sibirien 1998. D = Eisweder, aufgeschlossen an einem Kliff im Olenyokskaya Kanal, Lena-Delta, Sibirien 2007. Aufnahmen: A, B, D eigene Bilder, C Holger Becker.

Fig. 1: Results of cryopedogenic processes in permafrost. A = Segregated ice, Lena River Delta, Siberia 2007. B = Cryoturbation in the top soil of a Gelisol (Typic Psammenturbel), Arga Complex, northwestern Lena River Delta, Siberia 2009. C = Sorted circles (frost patterns) formed by frost sorting, Taymyr Peninsula, Siberia 1998. D = Ice wedges, cliff exposure at the Olenyokskaya Channel, Lena River Delta, Siberia 2007. A, B, D own photos, C Holger Becker.

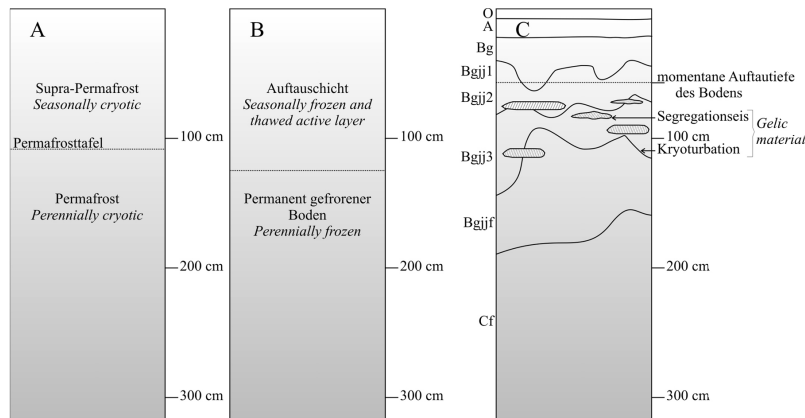


Abb. 2: Schematische Darstellung der Eigenschaften permafrostbeeinflusster Böden. A = Bodenthermische Eigenschaften. Die Permafrosttafel trennt den Supra-Permafrost (Temperatur kann über zwei Jahre hinweg zeitweise über 0 °C liegen) vom Permafrost (Temperatur liegt mindestens zwei Jahre kontinuierlich unter 0 °C). B = Gefrier-Tau-Regime der Böden mit der saisonal zeitweise gefrorenen und zeitweise getauten Bodenschicht und dem darunterliegenden permanent gefrorenen Boden. C = Beispiel für ein Profil eines permafrostbeeinflussten Bodens mit angegedeuteter Kryoturbation und Segregationseis (gelic material nach US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2010)).

Fig. 2: Schematic view of properties of permafrost-affected soils. A = The soil-thermal properties. The permafrost table divides the supra-permafrost (temperature can temporarily be higher than 0 °C within two consecutive years) and the permafrost (temperature is at least two consecutive years lower than 0 °C). B = the freeze-thaw-regime of the soils with the seasonally frozen and thawed active layer and the subjacent perennially frozen soil. C = Example of a permafrost-affected soil profile. Cryoturbation and segregated ice (gelic material according to US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2010)) are indicated.

BLATTER & HAUCK 2012) und den eisfreien Gebieten der Antarktis vor, hier allerdings nur in kleinen Flächenanteilen (0,35 % der Antarktis, BOCKHEIM 1995, VIEIRA et al. 2010; vgl. SCHWAMBORN et al. 2012). Die antarktischen permafrostbeeinflussten Böden stellen wegen des durchweg trockenen Permafrosts besondere extremkalte und salzreiche Standorte/Habitats dar (BOCKHEIM 1979, 2002, BOCKHEIM & MCLEOD 2008, vgl. SCHWAMBORN et al. 2012).

Die Verbreitung der terrestrischen Permafrostgebiete entspricht nicht vollständig der Verbreitung der permafrostbeeinflussten Böden. Diese Böden bilden eine eigene Klasse (Order) bzw. Referenzgruppe (Reference Group) auf oberster Kategorie in den verschiedenen internationalen Bodensystematiken. Aktuell werden im Wesentlichen das amerikanische Klassifikationssystem *Keys to Soil Taxonomy* (SOIL SURVEY STAFF 2010) mit den so genannten Gelisols (lat. gelus = Eis) als permafrostbeeinflusste Bodenklasse (Abb. 3 und 4) und das internationale Referenzsystem der *WRB – World Reference Base for Soil Resources* der internationalen *Food and Agriculture Organisation* (FAO 2007) mit der Cryosol-Gruppe verwendet (griech. κρύος (cryos) = kalt). Die diagnostischen Horizonte bzw. Merkmale dieser Böden sind die Existenz von Permafrost im obersten Meter des Bodens oder deutliche Kryoturbationsmerkmale und/oder Segregationseis (gelic

material nach der *US Soil Taxonomy* (SOIL SURVEY STAFF 2010)) in der Auftauschicht des Bodens oberhalb des innerhalb von 2 m Tiefe vorkommenden Permafrosts (Abb. 2 und 4). Ein Vorteil der Nutzung dieser beiden Systeme ist die einfache Vergleichbarkeit der verschiedenen nationalen und internationalen Studien zu permafrostbeeinflussten Böden.

Innerhalb der russischen Klassifikationssysteme werden die auf russischem Gebiet weit verbreiteten permafrostbeeinflussten Böden mit Kryoturbation und Kryometamorphose als *Cryozeme* in einer eigenständigen Bodenklasse behandelt. Alle anderen Böden dieser Gebiete ohne diese beiden Merkmale werden zu den anderen Bodenklassen mit der Zusatzangabe des unterlagernden Permafrosts gestellt (z.B. Alluvisol unterlagert von Permafrost, SHISHOV et al. 2004). Alternativ wird der Permafrost als Zustand von Böden mit in deren Spezifikationen aufgenommen (ELOVSKAYA 1987).

In Deutschland kommen permafrostbeeinflusste Böden nur als reliktsche oder fossile Reste von periglaziären Bodenbildungen vor. Sie werden gemäß der aktuellen Deutschen Bodenklassifikation (AG BODEN 2005) nicht eigenständig beschrieben, können aber als Paläoböden (z.B. rezenter Podsol über kryoturbat verwürgtem Brodelboden) erfasst werden. Reste dieser Böden werden teilweise im Zusammenhang mit

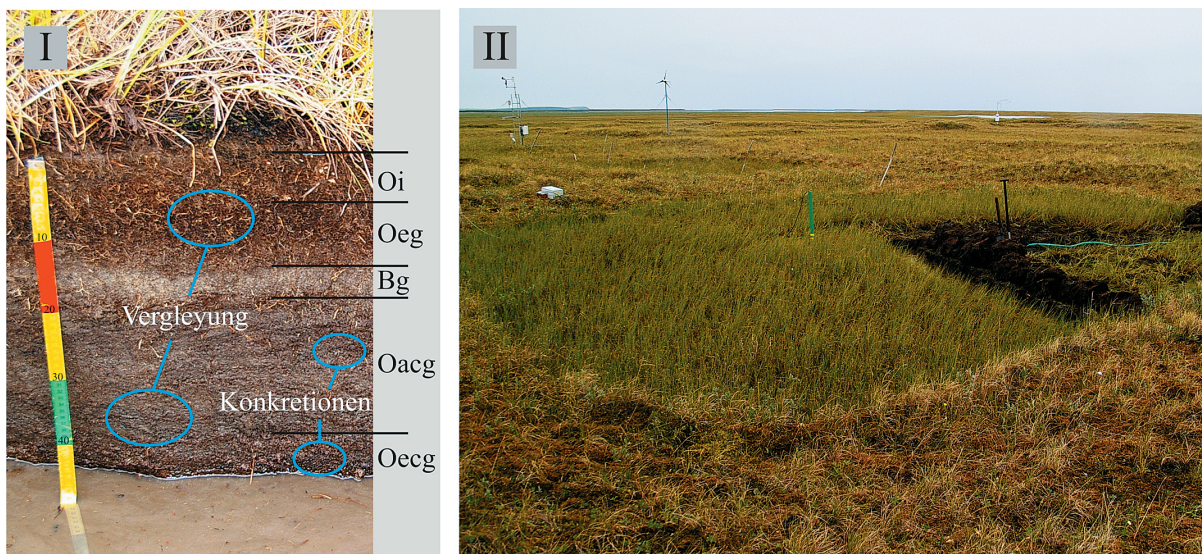


Abb. 3: Ein nicht kryoturbierter, von organischem Material dominierter, permafrostbeeinflusster Boden, ein „Typic Historthel“ (I) und das Arbeitsgebiet (II) Insel Samoylov, zentrales Lena-Delta, Sibirien 2007, aus dem er stammt. **Historthel** = **Great Group: Hist** = griechisch ἵστός (histos) = Gewebe (Pflanzen). **Suborder: orth** = Orthels sind Böden, die wenig oder gar nicht kryoturbiert und außer polygonalen keine weiteren Frostmuster aufweisen. **Order: el** = formatives Element der Gelisole = lat. Gelu = Frost, Kälte. „O“ und „B“ bezeichnen Bodenhorizonte. „O“ bezeichnet einen von organischer Substanz dominierten Bodenhorizont, der an der Bodenoberfläche entstanden ist. Er besteht aus nichtzersetzt oder teilweise zersetzter Streu (i.e. Blätter, Nadeln, Zweige, Moose, Flechten). „B“ bezeichnet einen Unterbodenhorizont, welcher unter einem „O-“ oder „A-“ Horizont gebildet wird und eine deutliche Veränderung gegenüber dem Ausgangsgestein zeigt. Er kann durch viele Merkmale gekennzeichnet sein. Ein Beispiel ist die Vergleyung (Suffix „g“), die graue, grünliche oder bläuliche Flecken durch reduziertes Eisen verursacht. Das Eisen wird reduziert, wenn der Boden lange Zeit wassergesättigt ist. In diesem Fall besteht er aus fluvialen Sanden; diese wurden bei einer Überflutung des Untersuchungsgebietes abgelagert. Die Suffixe „i“, „e“ und „a“ unterteilen die organische Substanz des O-Horizonts in „schwach“, „fortgeschritten“ und „stark“ zersetzte. Das Vorhandensein von Eisen- und/oder Mangankonkretionen wird mit dem Suffix „c“ gekennzeichnet.

Fig. 3: A non cryoturbated organic dominated permafrost-affected soil, Typic Historthel (I) and the study area it is from (II) – Samoylov Island, central Lena River Delta, Siberia 2007. **Historthel** = **Great Group: Hist** = greek ἵστός (histos) = tissue (plant); **Suborder: orth** = Orthels are soils with little or no cryoturbation and except polygons, patterned ground is lacking; **Order: el** = formative element of Gelisols = lat. Gelu = frost, coldness. “O” and “B” indicate soil horizons. “O” indicates an organic matter-dominated horizon that has formed at the soil surface. It consists of undecomposed or partially decomposed litter (i.e., needles, twigs, moss, and lichens). “B” indicates a subsurface horizon that has formed below an “O” or “A” horizon. It shows the obliteration of all or much of the parent soil material structure. It can be characterized by many qualifiers. Examples are gleying properties (suffix “g”) described as formation of grey, greenish and bluish spots caused by reduced iron. Iron reduction occurs when soils are water-saturated for long periods. In this case the soil parent material consists of fluvial sands that were deposited during a flood in the study area. Suffixes “i”, “e” and “a” classify the O horizon’s organic matter in “slightly”, “intermediately” and “highly” decomposed. The existence of iron and/or manganese concretions is indicated by suffix “c”.

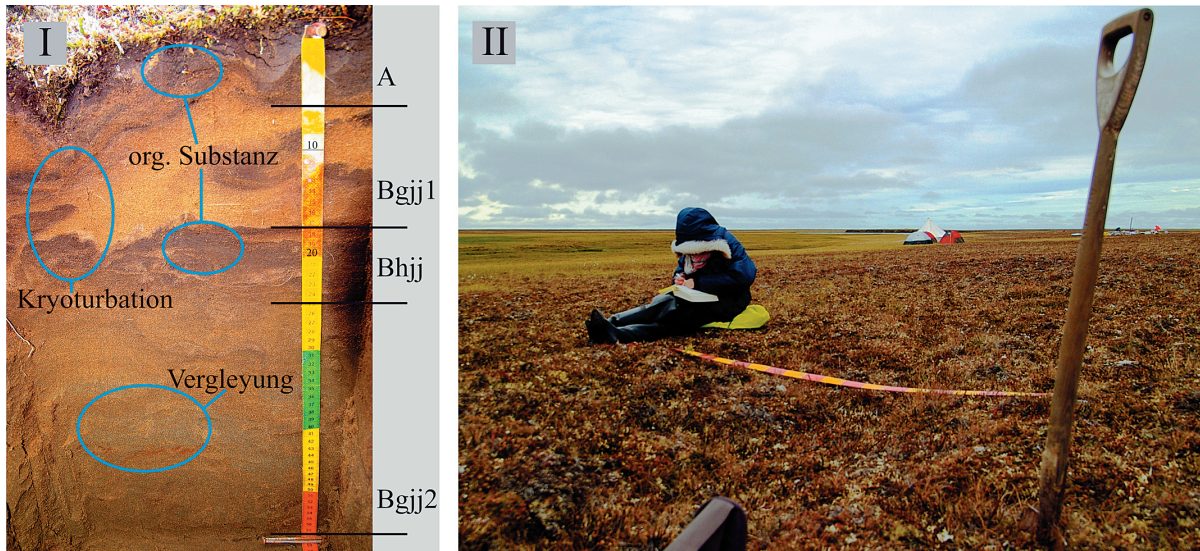


Abb 4: Ein sanddominierter und kryoturbat verwürger permafrostbeeinflusster Boden, ein „Typic Psammoturbel“ (I) und das Arbeitsgebiet (II), Arga-Komplex im nordwestlichen Lena-Delta (Sibirien 2009), aus dem er stammt. **Psammoturbel** = **Great Group: Psamm(o)** = griechisch $\alpha\mu\mu\omicron\varsigma$ (psamm) = Sand, **Suborder: turb** = lat. **Turbatio** = Unordnung, Störung, **Order: el** = formatives Element der Gelisole = lat. **Gelu** = Frost, Kälte. „A“ und „B“ bezeichnen Bodenhorizonte. „A“ bezeichnet einen Mineralbodenhorizont, der an der Bodenoberfläche oder unter einem organischen Auflagehorizont gebildet wurde. Er hat humifizierte organische Substanz akkumuliert, welche in die Mineralfraktion eingearbeitet ist. „B“ bezeichnet Unterbodenhorizonte (vgl. Abb. 3). In diesem Profil finden sich mehrere B-Horizonte mit unterschiedlichen Merkmalen. Das Suffix „h“ zeigt, dass im Bodenhorizont eine natürliche Anreicherung von organischer Substanz oder von Sesquioxiden stattgefunden hat und „jj“ bezeichnet kryoturbierte Horizonte. Das Suffix „g“ beschreibt eine Vergleyung (vgl. Abb. 3).

Fig. 4: A sand-dominated and cryoturbaed permafrost-affected soil, Typic Psammoturbel (I) and the study area it is from (II) the Arga Complex, northwestern Lena River Delta, Siberia 2009. **Psammoturbel** = **Great Group: Psamm(o)** = greek $\alpha\mu\mu\omicron\varsigma$ (psamm) = sand; **Suborder: turb** = lat. **Turbatio** = disturbance; **Order: el** = formative element of Gelisols = lat. **Gelu** = frost, coldness. „A“ and „B“ indicate soil horizons. „A“ indicates a mineral horizon that has formed at the surface or below an organic horizon. It has accumulated humified organic matter that is mixed with the mineral fraction. „B“ indicates subsurface horizons (see Fig. 3). Within this profile there are several B horizons with different properties. The suffix „h“ indicates an illuvial accumulation of organic matter or sesquioxides and „jj“ stands for cryoturbaed horizons. Suffix „g“ is explained in the caption of Figure 3.

den periglaziären Lagen beschrieben (AG BODEN 2005, ALTERMANN et al. 2008).

Die räumliche Ausdehnung der Gelisole bzw. Cryosole (Abb. 5) nördlich des fünfzigsten Breitengrades beträgt 27 % der Landfläche (JONES et al. 2010) und entspricht damit ca. 8,6 Millionen km². Vergesellschaftet sind permafrostbeeinflusste Böden (hier Cryosole nach FAO 2007) mit weiteren wichtigen Bodentypen dieser Breitengrade wie Podsolen (Versauerungsböden, 15 %), Leptosolen (Festgesteinsböden, 8 %) und Cambisolen (verbraunte Böden, 8 %) (JONES et al. 2010).

Die Eigenschaften und die räumliche Verbreitung der permafrostbeeinflussten Böden innerhalb der verschiedenen Länder wurden von TARNOCAI (2004) und SMITH & VELDHUIS (2004) für Kanada, von PING et al. (2004a) für Alaska, von GORYACHKIN & IGNATENKO (2004), NAUMOV (2004), KARAVAEVA (2004), SOKOLOV et al. (2004) und GRACHEVA (2004) für die vielfältigen und großflächigen Gebiete Russlands, von MAXIMOVICH (2004) für die Mongolei und von PING et al. (2004b) für China zusammengetragen. Eine umfassende Beschreibung der Forschung der permafrostbeeinflussten Böden mit ihrer Geschichte sowie der räumlichen Verbreitung dieser Böden mit ihren Eigenschaften wird in KIMBLE (2004) gegeben. Ebenso thematisiert ist die Diskussion der unterschiedlichen nationalen und internationalen Klassifikationssysteme, aber auch der möglichen Nutzungsfunktionen als Siedlungsraum, Agrarfläche und als Lieferant für Bodenschätze. Mit *Permafrost Soils* (MARGESIN 2009) erschien ein umfang-

reiches Buch, in dem der Fokus auf der Biologie der permafrostbeeinflussten Böden liegt. Aspekte wie Biodiversität und Bioaktivität (OZERSKAYA et al. 2009, PANIKOV 2009), die Auswirkungen der globalen Erwärmung (WAGNER & LIEBNER 2009, vgl. SCHIRRMEISTER et al. 2012) und die Problematik der Schadstoffakkumulationen (BARNES & CHUVILIN 2009) in Permafrostgebieten werden in diesem Buch thematisiert.

PERMAFROSTBEEINFLUSSTE BÖDEN ALS KOHLENSTOFF-SPEICHER

Die niedrigen durchschnittlichen Temperaturen und die extremen annualen Temperaturdifferenzen in den Permafrostgebieten haben im Quartär zu einer beträchtlichen Akkumulation von organischer Substanz geführt. Die in der kurzen Sommerphase neu gebildete Biomasse wird nach dem Absterben zunächst in der obersten Auftauschicht des Bodens akkumuliert. Durch die jährlich wiederholte Akkumulation der organischen Substanz – und oft auch zusätzlich durch fluviale oder äolische Sedimentation mineralischer Substanz – kann es zu einer Höherverlegung der Bodenoberfläche sowie der Oberfläche der dauerhaft gefrorenen Schicht kommen, so dass sukzessive immer mehr organische Substanz in diese inkorporiert wird. Auch Kryoturbation führt zur Einarbeitung von organischer Substanz in tiefere Bodenhorizonte.

Ein weiterer Prozess ist die Verlagerung von organischer

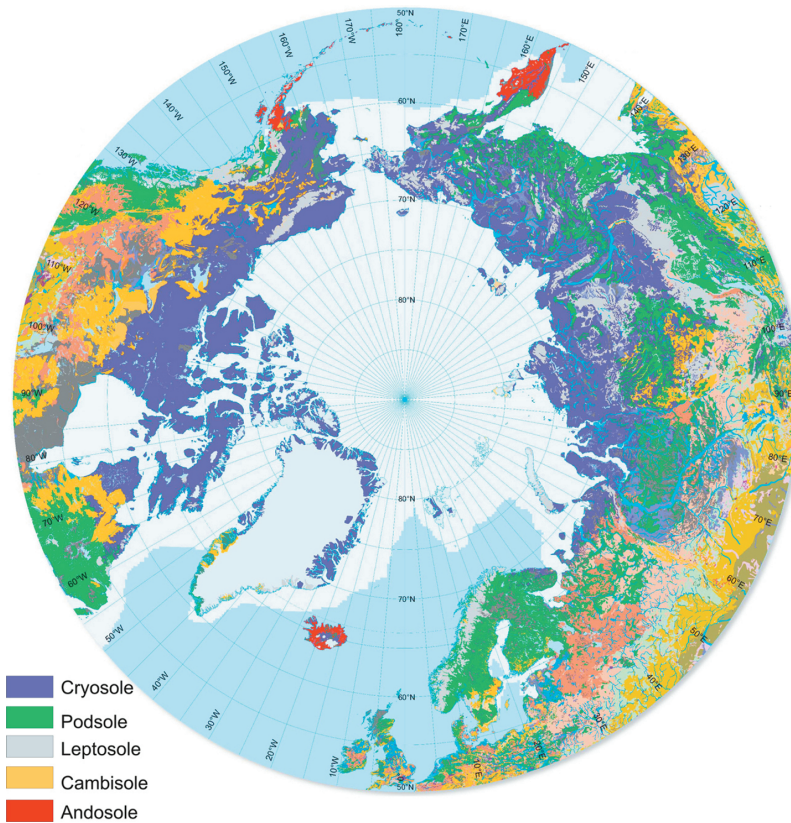


Abb. 5: Bodenkarte der Gebiete nördlich 50° N (Jones et al. 2010). Die Legende zeigt die diesen Raum dominierenden Böden sowie die auf Island, Kamtschatka und Alaska weit verbreiteten Vulkanascheböden, die Andosole. Bodenklassifikation nach der World Reference Base for Soil Resources (FAO 2007).
Bodenatlas der nördlichen zirkumpolaren Regionen: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Documents/Circumpolar_atlas.pdf

Fig. 5: Soil map of territories above 50° N (Jones et al. 2010). The legend represents soils dominating this area and Andosols that developed from volcanic ash and are prevalent in Iceland, Kamchatka and Alaska. Soil classification according to the World Reference Base for Soil Resources (FAO 2007).
Soil atlas of the northern circumpolar region: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Documents/Circumpolar_atlas.pdf

Substanz in gelöster Form und deren Ausfällung und Ablagerung oberhalb der Permafrosttafel. Dort konnte sie sich in Folge der sehr niedrigen Temperaturen und niedriger Abbauraten über die Jahrtausende stark anreichern. Die permafrostbeeinflussten Böden sind deshalb relevante, über lange Zeiträume effektive Kohlenstoffsinken (POST et al. 1982, CORRADI et al. 2005, KUTZBACH et al. 2007, VAN DER MOLEN et al. 2007). Die Senkenfunktion erfolgte hauptsächlich über die oberflächennahen Böden, welche die Biomasse der typischen, an das arktische Klima angepassten Tundravegetation nach deren Absterben als Streu in ihren Kohlenstoffspeicher aufnehmen. Nach aktuelleren Schätzungen sind in den permafrostbeeinflussten Böden bis in eine Tiefe von 3 m 1024 Pg organischen Kohlenstoffs gespeichert (TARNOCAI et al. 2009). Nimmt man die tief reichenden und an organischem Kohlenstoff reichen Sedimente der Yedoma-Landschaften und arktischen Deltas hinzu, belaufen sich die Gesamtschätzungen des Speichers an organischem Kohlenstoff in den Permafrostgebieten sogar auf ca. 1670 Pg. (TARNOCAI et al. 2009). Diese Schätzungen stützen sich auf die *Northern Circumpolar Soil Carbon Database* (NCSCD, TARNOCAI et al. 2007), die umfangreichste momentan verfügbare Datenbank zum organischen Kohlenstoff in permafrostbeeinflussten Böden. Jedoch sind auch die Informationen dieser Datenbank derzeit noch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Bei genauerer Betrachtung der Verteilung der bisher berücksichtigten Standorte zeigt sich, dass bei der Bewertung der Zuverlässigkeit der in der Datenbank gespeicherten Bodendaten (100 % = „zuverlässig“, 0 % = „unzuverlässig“, nach KUHRy et al. 2010) die arktischen Deltagebiete und Yedoma-Landschaften mit eisreichen

Permafrostsedimenten in Sibirien (Abb. 6) (SCHIRRMUSTER et al. 2012) durch die bisher sehr lückenhafte und schlecht zugängliche Datenlage zu permafrostbeeinflussten Böden dieser Region begründet, mit einer Zuverlässigkeit von weniger als 33 % bewertet werden. Wohingegen Gebiete des nordamerikanischen Raumes mit bis zu 80 % sehr gut repräsentiert sind (KUHRy et al. 2010). Dieses ist durch die überdurchschnittlich hohe Anzahl der publizierten Bodenuntersuchungen in diesen Regionen begründet.

In den Publikationen der letzten Jahre wurden einige Unklarheiten bei den Schätzungen der in permafrostbeeinflussten Böden gespeicherten Kohlenstoffmengen deutlich. Diese resultierten einerseits aus der unausgewogenen Verteilung vorhandener Bodenuntersuchungsdaten und andererseits aus den weit variierenden Definitionen der jeweiligen Forschungsobjekte. Die Menge der Publikationen zu den Kohlenstoffgehalten in den permafrostbeeinflussten Böden ist überschaubar (Tab. 1). Am Beispiel der beiden meist zitierten Publikationen, POST et al. (1982) und TARNOCAI et al. (2009), lassen sich diese unterschiedlichen Betrachtungsweisen gut verdeutlichen: Während POST et al. (1982) im Rahmen einer globalen Bestimmung der Kohlenstoff-Pools aller Ökozonen nur 48 Bodenprofile in arktischen Tundravegebieten bis 100 cm Tiefe berücksichtigten, haben TARNOCAI et al. (2009) die bodenkundlichen Ergebnisse von vorhandenen Untersuchungen aus Permafrostregionen (z.B. ZIMOV et al. 2006b, SCHUUR et al. 2008) kombiniert, aktualisiert und um eigene Daten ergänzt. Dabei wurden mehr als 400 Bodenprofile ausgewertet und der Pool an organischem Kohlenstoff für verschiedene Untersu-

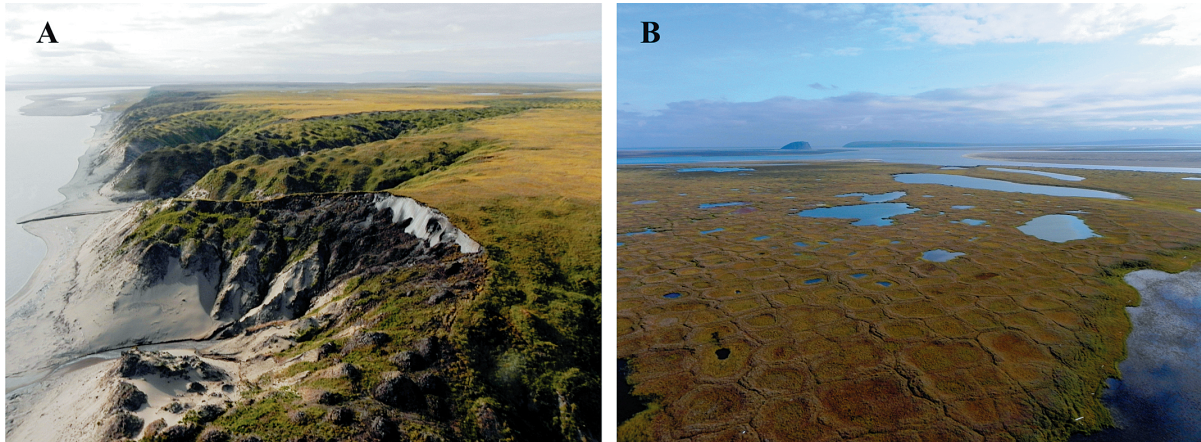


Abb. 6: Beispiele von in der „Northern Circumpolar Soil Carbon Database“ (NCSCD) unterrepräsentierten Landschaften. A = Yedoma-Landschaft der Insel Kurungnakh im Lena-Delta; Aufschluss eisreicher Sedimente eines Fluss-Erosionskliffs. B = Polygonale Tundra der Insel Samoylov im Lena-Delta. Aufnahmen 2010.

Fig. 6: Examples of underrepresented landscapes in the Northern Circumpolar Soil Carbon Database (NCSCD). A = Yedoma landscape of Kurungnakh Island; an erosional river cliff with exposed ice-rich sediments. B = Polygonal tundra of Samoylov Island. Both islands are located in the Lena River Delta in northeastern Siberia. Photos 2010.

chungsobjekte, wie die permafrostbeeinflussten Böden bis 3 m Tiefe, die arktischen Deltagebiete (bis 50 m Tiefe) oder die Yedoma-Landschaften (bis 25 m Tiefe) kalkuliert.

Betrachtet man die verfügbaren Daten zu den Kohlenstoffgehalten in den permafrostbeeinflussten Böden (Tab. 1), so fällt auf, dass sich die Untersuchungsergebnisse in zwei Hauptgruppen unterteilen lassen: a) die Ergebnisse bis in eine Tiefe von 30 cm und b) die Ergebnisse in eine Tiefe bis 100 cm. Eine weitere Gruppe bilden Kohlenstoff-Untersuchungen, die in ihrer Beprobung auf die etwas weiter definierte Auftauschicht (Tiefen von 20 cm bis 50 cm) oder nur auf bestimmte Bodenhorizonte begrenzt sind. Alle Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die permafrostbeeinflussten Böden sehr viel organischen Kohlenstoff pro Bodenfläche speichern. So schwankt der Kohlenstoff-Pool zwischen 4 kg m^{-2} und 24 kg m^{-2} für die oberen 30 cm der Böden. Wenn die von den Autoren unterschiedlich definierte Tiefe des Auftaubodens am Tag der Beprobung berücksichtigt wurde, lag der Kohlenstoff-Pool zwischen 13 kg m^{-2} und 29 kg m^{-2} . Die Ergebnisse der Studien, welche den Kohlenstoff-Pool bis in 100 cm Tiefe untersuchten, schwanken zwischen 4 kg m^{-2} und 69 kg m^{-2} (Tab. 1). Darüber hinaus machen diese Angaben die sehr hohe Schwankungsbreite der Ergebnisse aus unterschiedlichen Permafrostregionen deutlich.

Betrachtet man die Angaben der aktuellen Literatur zur Gesamtmasse des organischen Kohlenstoffs in den Permafrostgebieten (Tab. 1) wird der problematische Aspekt der Vergleichbarkeit offensichtlich. Die Ergebnisse der Studien beziehen sich auf in ihrer Größe sehr unterschiedliche Flächen. Die untersuchten Flächen können Länder, Regionen oder auch Vegetationseinheiten sein. Trotz der schwierigen Vergleichbarkeit verdeutlichen die Ergebnisse dieser Studien aber, dass der Gesamtpool an organischem bodeneigenem Kohlenstoff in den permafrostbeeinflussten Böden mit 1024 Pg (TARNOCAI et al. 2009) sehr hoch ist und die Masse des Kohlenstoffs der gesamten globalen Vegetationsbiomasse bzw. der Atmosphäre von 650 Pg bzw. 750 Pg (IPCC 2007) über-

steigt. Die in permafrostbeeinflussten Böden gespeicherten Kohlenstoff-Mengen sind somit als eine der wichtigsten Größen zum Verständnis und zur Funktion der Kryosphäre innerhalb des Klimasystems zu betrachten. Permafrostbeeinflusste Böden mit ihren besonderen Kohlenstoffdynamiken reagieren aufgrund der Temperaturabhängigkeit sehr empfindlich auf Umwelt- und Klimaänderungen. Es kann sowohl für die Vergangenheit als auch für die Gegenwart angenommen werden, dass globale und regionale Umwelt- und Klimaveränderungen und die Dynamik des organischen Kohlenstoffs in den Böden der Permafrostgebiete über physikalische und biogeochemische Rückkoppelungsmechanismen miteinander interagierten und auch künftig interagieren werden (MCGUIRE et al. 2009, GROSSE et al. 2011). Bei der aktuell prognostizierten Klimaerwärmung mit ihren besonders starken Auswirkungen in den arktischen Regionen (LEMBKE et al. 2007) und dem damit einhergehenden lokalen und regionalen Rückgang und der Degradation des Permafrostes (ANISIMOV & NELSON 1997) werden sich auch die Eigenschaften der permafrostbeeinflussten Böden grundlegend ändern. Eine Erwärmung innerhalb der Permafrostgebiete kann zur Vergrößerung der Mächtigkeit der saisonalen Auftauschicht im Oberbodenbereich (Abb. 2 und 7) und zur Veränderung ihrer hydrologischen Standortverhältnisse führen (KOVEN et al. 2011). Dies wird wahrscheinlich auch zu einem verstärkten mikrobiellen Abbau der organischen Substanz und einer intensiveren Freisetzung der klimarelevanten Spurengase Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas) führen (DUTTA et al. 2006, WAGNER et al. 2007, KHVOROSTYANOV et al. 2008, SCHUUR et al. 2009).

Wenn also die aktuelle Klimaerwärmung in der Arktis einen vermehrten Rückgang der Ausdehnung der Permafrostgebiete bedingt, was wiederum zu einer verstärkten Freisetzung von Treibhausgasen in die Erdatmosphäre führt, muss mit einem weiteren Temperaturanstieg global, aber auch in den Permafrostgebieten selbst, gerechnet werden (Abb. 8). Diese Prozesse zeigen die positiven Rückkoppelungseffekte in Permafrostlandschaften bzw. in der Kryosphäre unseres

Beprobungstiefe AUTOREN	C _{org} -Pool kg m ⁻² (min)	C _{org} -Pool kgm ³ (max)	Masse SOC Pg	Untersuchungsgebiet wie in den Publikationen
Tiefe 0-30 cm STOLBOVOI 2002 TARNOCAI et al. 2009 HUGELIUS et al. 2010 ZUBRZYCKI et al. 2012	11,6 4,0	13,3 16,3 24,0	62 191	Russland nördliche Permafrostregionen Küste des Tulemalu Lake, zentrale kanadische Arktis Nord-Süd-Transekt (73,5°- 69,5° N) entlang der Lena, Sibirien
Tiefe des Auftaubodens OECHEL & BILLINGS 1992 TARNOCAI & BALLARD 1994 ORLOV et al. 1996 NADELHOFFER et al. 1997 GUNDELWEIN et al. 2007	13,0 21,7 14,5	29,0 26,2 14,5 20,3 14,5	55 59	Tundra Kanadische Arktis / Subarktis Russland Alaska Labaz-See, Taimyr-Halbinsel
Tiefe 0-100 cm POST et al. 1982 TARNOCAI & SMITH 1992 MATSUURA & YEFREMOV 1995 ROZHKOV et al. 1996 PING et al. 1997 STOLBOVOI 2002 TARNOCAI et al. 2003 POST 2006 GUNDELWEIN et al. 2007 PING et al. 2008 TARNOCAI et al. 2009 HUGELIUS et al. 2010 BLISS & MAURSETTER 2010 PING et al. 2010	 4,0 11,0 31,4 16,6 25,6 22,6 12,6	21,8 63,0 20,0 69,2 26,9 59,2 14,2 30,7 34,8 66,6 33,8 54,5 50,9	192 116 107 268 98 496 38	Tundra Kanada Russland Tundra und nördliche Taiga Russlands Tundra Alaskas Russland nördliche Permafrostregionen Tundra Labaz-See, Taimyr-Halbinsel Nordamerikanische Arktis nördliche Permafrostregionen Küste des Tulemalu Lake, zentrale kanadische Arktis die Gelisole Alaskas Diskontinuierlicher, warmer Permafrost, boreale Wälder Alaskas
Tiefe 0-300 cm TARNOCAI et al. 2009	159,2	358,2	1024	nördliche Permafrostregionen
Tiefe größer als 300 cm TARNOCAI et al. 2009 ZIMOV et al. 2006a ZIMOV et al. 2006b TARNOCAI et al. 2009 SCHIRRMESTER et al. 2011	 1	65,0 2,6 2,38 2,6 17	241 500 450 407 250 - 375	arktische Deltas Yedoma-Landschaften in Nordsibirien Yedoma-Landschaften in Nordsibirien Yedoma-Landschaften in Nordsibirien 20 Küstenaufschlüsse in Nordostsibirien

Tab. 1: Eine Übersicht von Kohlenstoff-Studien in unterschiedlichen Permafrostregionen. Dargestellt sind Teilergebnisse der genannten Studien zu Permafrost beeinflussten Böden. Diese Liste zeigt nur einige Beispiele und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. SOC = bodeneigener organischer Kohlenstoff.

Tab. 1: Overview of carbon studies from different permafrost regions. Only results related to the permafrost-affected soils are presented. This list shows only some examples and is not intended to be exhaustive. SOC = soil organic carbon.

Erdsystems, die noch nicht ausreichend in den Klimamodellen zur Temperaturprojektion berücksichtigt sind. Aufgrund dieser komplexen Effekte stellen gerade die Permafrostgebiete ein wichtiges – auch für Politik und Gesellschaft relevantes – mögliches Kippelement des globalen Klimasystems dar (LENTON & SCHELLNHUBER 2010). Als Kippelement werden Bestandteile des Erdsystems bezeichnet, die bei Belastung über kritische Grenzen hinaus grundsätzlich und unwiderruflich verändert werden können (LENTON & SCHELLNHUBER

2010). Ob die Böden der Permafrostgebiete bereits als Kohlenstoffquellen wirken (OECHEL et al. 1993, ZIMOV et al. 1997, OECHEL et al. 2000) oder immer noch Kohlenstoff akkumulieren (CORRADI et al. 2005, KUTZBACH et al. 2007, VAN DER MOLEN et al. 2007) ist bisher unklar und regional unterschiedlich zu bewerten. Die Komplexität dieser Kohlenstoffquellen/Kohlenstoffsenken-Funktionen der permafrostbeeinflussten Böden ist immer noch nicht ausreichend verstanden. Es fehlen sowohl Messungen als auch robuste, hinreichend

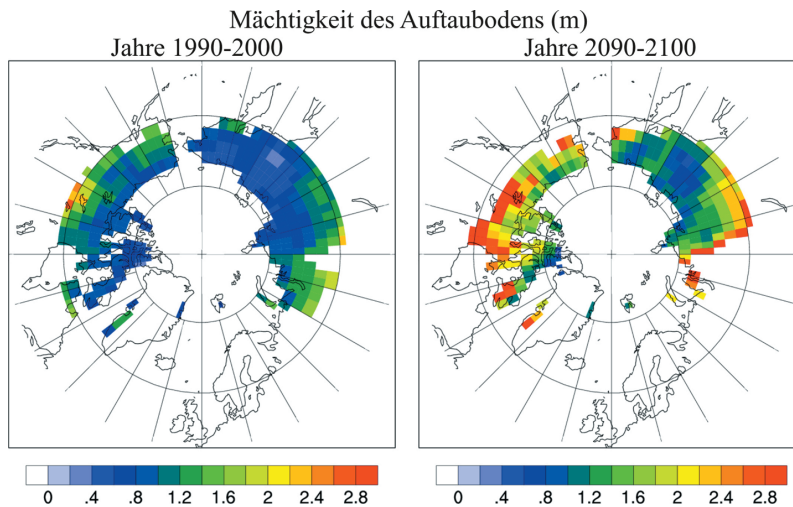


Abb. 7: Die modellierte maximale Mächtigkeit des saisonalen Auftaubodens in Metern für die Jahre 1990-2000 und die Jahre 2090-2100. Weiße Zellen stehen für Gebiete, für die kein Permafrost innerhalb der oberen 50 m berechnet wurde. (KOVEN et al. 2011, ©2011 PNAS), Auszug.

Fig. 7: The modelled maximum depth of the seasonally thawed soil, the active layer, in meters for the period 1990-2000 and 2090-2100. White cells indicate areas where no permafrost within 50 m depth was calculated. (KOVEN et al. 2011, ©2011 PNAS), excerpt.

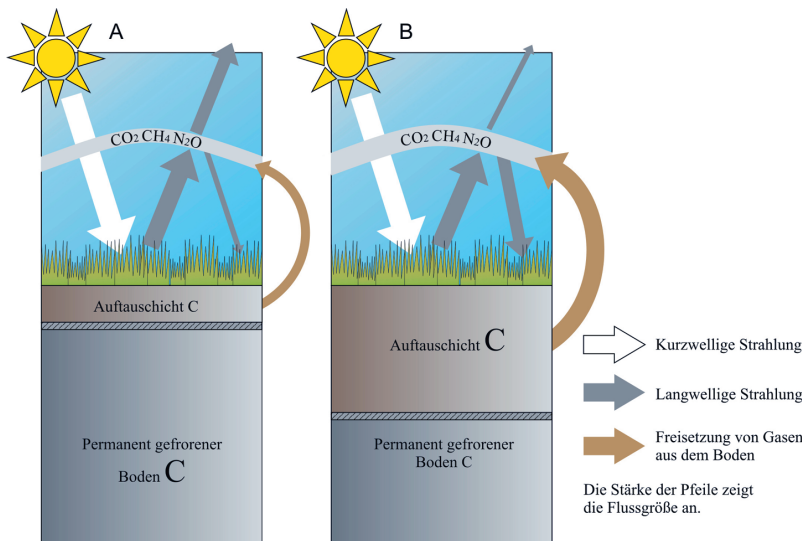


Abb. 8: Schematische Darstellung zur Rückkopplung der Kohlenstoffdynamik (C = Kohlenstoff) und den klimabedingten Änderungen in permafrostbeeinflussten Böden. A = Heutige Situation. B = Situation bei künftiger Klimaerwärmung. Nach BEER (2009).

Fig. 8: Schematic illustration of the carbon dynamic feedbacks (C = carbon) and the climate-driven changes within the permafrost-affected soils. A = Present situation. B = Situation with prospective higher temperatures. Figure according to BEER (2009).

validierte modellierte Projektionen und Vorhersagen, um belastbare Prognosen zur Entwicklung der Kohlenstoffdynamik der permafrostbeeinflussten Böden in dem sich erwärmenden Klimasystem zu erstellen (MCGUIRE et al. 2009).

AKTUELLER KENNNTNISSTAND ZUM KOHLENSTOFFPOOL IN PERMAFROSTBEEINFLUSSTEN BÖDEN IN RUSSLAND

Wegen der besonderen Relevanz der Kryosphäre und insbesondere des terrestrischen Permafrostes für die Klimasystemforschung hat die Anzahl publizierter wissenschaftlicher Artikel, welche den Kohlenstoff-Pool in den Permafrostregionen thematisieren, in den letzten fünf Jahren im Verhältnis zu den letzten 20 Jahren deutlich zugenommen (Abb. 9). Der überwiegende Teil dieser Artikel behandelt den nordamerikanischen Raum. In den letzten Jahren wurden jedoch auch verstärkt Gebiete des eurasischen Permafrostes – vor allem im russischen Raum – detailliert untersucht. Die Daten dieser

kleinen Untersuchungsgebiete können bisher nur verlässlich für lokale Hochskalierungen der Kohlenstoffmengen genutzt werden. Auch wurden spezielle Permafrosterscheinungen, wie die eis- und organikreichen Sedimente der Yedoma-Landschaften vermehrt untersucht, die bisher nur sehr unzureichend beachtet wurden (ZIMOV et al. 2006a).

Die oberflächennahen Böden der Permafrostgebiete Nordsibiriens spielen schon lange eine große Rolle bei der Untersuchung von Kohlenstoff-Pools und Treibhausgasemissionen durch russische Wissenschaftler und seit den 1990er Jahren auch durch große deutsch-russische Kooperationsprojekte. Neben der klassischen Bodenerfassung mit ihrer Genese und Verbreitung in Permafrostgebieten (KRASUK 1927, IVANOVA 1965, 1971, KARAVAeva 1969, TARGULYAN 1971, ELOVSKAYA et al. 1979, DESYATKIN & TETERINA 1991, PFEIFFER 1998, PFEIFFER et al. 2000, PFEIFFER et al. 2002) (vgl. Abb. 3, 4, 10 und 11) wurden auch zahlreiche physikalisch-chemischen Eigenschaften und Prozesse permafrostbeeinflusster Böden untersucht (PFEIFFER & JANSEN 1992, OKONESHNIKOVA 1994,

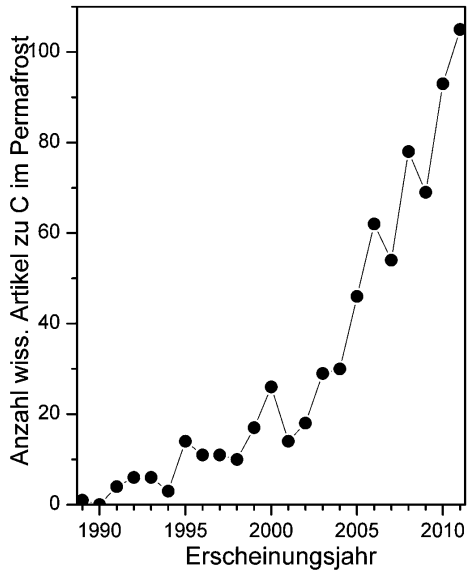


Abb. 9: Anzahl wissenschaftlicher Artikel in den Jahren 1989 bis 2011 als Ergebnis einer Recherche nach den Schlüsselbegriffen „permafrost + carbon“ bei Web of Knowledge (www.webofknowledge.com).

Fig. 9: Number of scientific papers published between 1989 and 2011 as a result of a search for the keywords „permafrost + carbon“ in Web of Knowledge (www.webofknowledge.com).

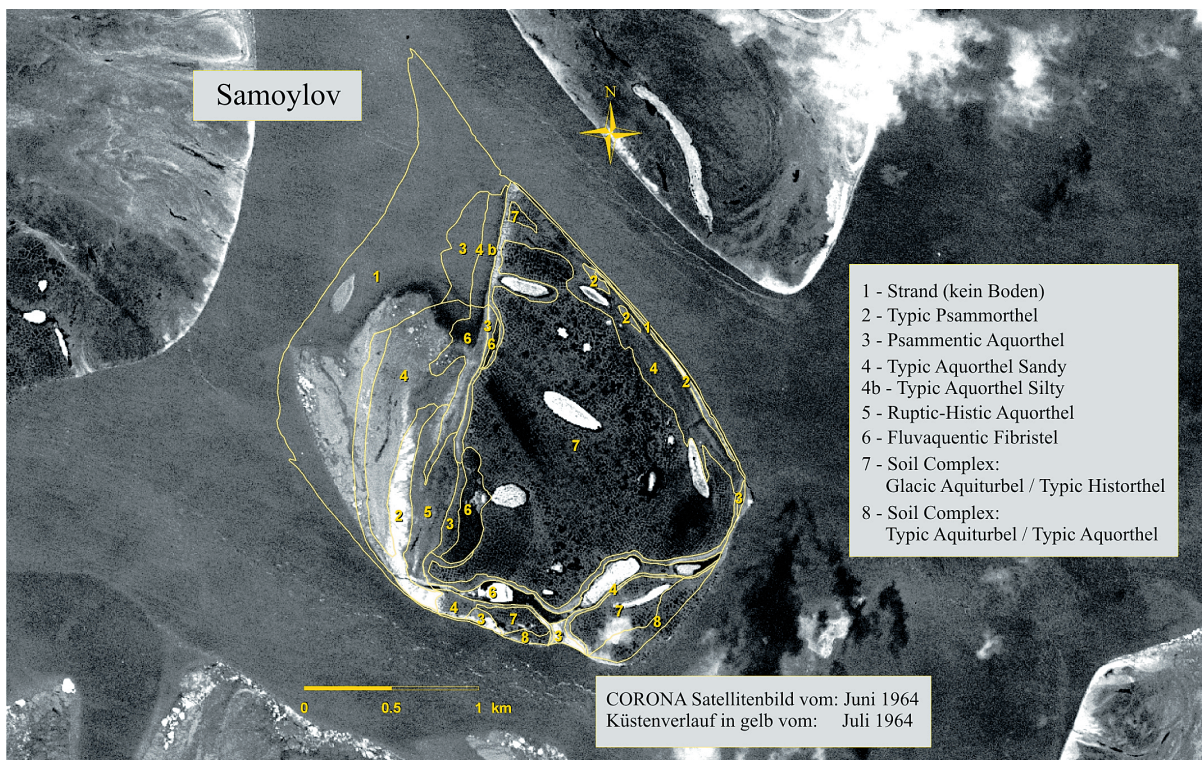


Abb. 10: Bodenkarte der Insel Samoylov im Lena-Delta als Ergebnis langjähriger Bodenforschung in dieser Region. Erstellt aus Daten von PFEIFFER et al. 2000, 2002 (vgl. SANDERS et al. 2010). Bodenklassifikation nach der US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2010). Der eingetragene Küstenverlauf vom Juli 1964 verdeutlicht die hohe Küstendynamik der Strandflächen und Überflutungsebenen im Westen der Insel.

Fig. 10: A soil map of Samoylov Island as a result of long-term soil research within this area of the Lena River Delta. Generated from data by PFEIFFER et al. 2000 and 2002 (see SANDERS et al. 2010). Soil classification according to the US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 2010). The plotted coast line from July, 1964 points out the high coastal dynamics within the beach and floodplain in the western part of island.

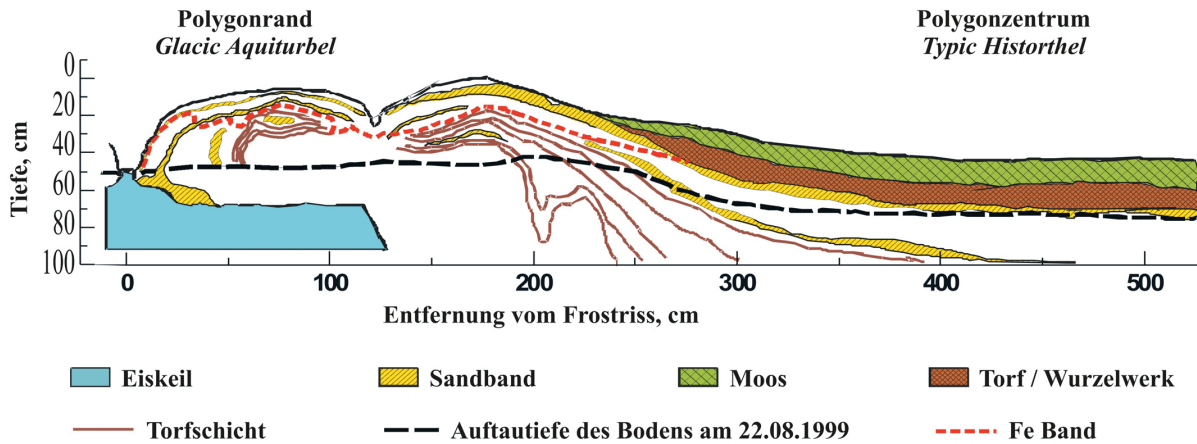


Abb. 11: Querschnitt durch ein „low-centred“ Polygon mit einer Oberflächeneinsenkung über dem Eiskeil und einer weiteren Einsenkung am Rande des Eiskeils. Böden, die sich in diesem Polygon gebildet haben, sind im Polygonrand über dem Eiskeil ein „Glacic Aquiturbel“ und im Polygonzentrum ein „Typic Historthel“. Schema nach Feldaufnahmen vom 22.08.1999.

Fig. 11: Cross section of a low centred polygon with a surface depression above the ice wedge and another one at the ice wedge's end. Soils that have developed in this polygon are a Glacic Aquiturbel at the polygon rim above the ice wedge and a Typic Historthel in the polygon centre. Scheme compiled from field observations of 22.08.1999.

Glacic Aquiturbel – Polygonrand eines „low-centred“ Eiskeilpolygons							
Horizont	Tiefe (cm)	Textur	red. Verhältnisse	pH	C _{org}	C/N	Wurzeln
Ajj	0-12	lehmgiger Sand	nein	5,9	1,8	21	viele
Bjgg1	12-15	sandiger Lehm	nein	6,2	2,2	21	häufig
Bjgg2	15-47	Lehm	ja	5,5	2,9	24	häufig
Bjggf	47-70	Lehm	ja	6,0	3,0	20	keine
Typic Historthel – Polygonzentrum eines „low-centred“ Eiskeilpolygons							
Horizont	Tiefe (cm)	Textur	red. Verhältnisse	pH	C _{org}	C/N	Wurzeln
Oi	0-11	Torf	nein	5,0	22,1	43	wenige
OeBg	11-26	Torf + Sand	ja	4,8	12,6	35	viele
Bg	26-31	Sand	ja	4,8	2,1	>100	häufig
Bgf	31-64	sandiger Lehm	ja	5,0	4,2	30	keine

Tab. 2: Chemische Eigenschaften zweier Beispielbodenprofile (vgl. Abb. 11 und 13) mit Angaben zur Horizontbezeichnung nach der US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2010), zur Tiefe der einzelnen Horizonte, zur Textur, zu den Hydromorphieverhältnissen, zum pH-Wert, zum gravimetrischen Gehalt an organischem Kohlenstoff in Gewichtsprozent, zum C/N-Verhältnis und zur Durchwurzelung.

Tab. 2: Chemical properties of two exemplary soil profiles (see Fig. 11 and 13) with their horizons according to the US Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2010), horizon depth, texture, hydromorphology, pH value, gravimetric organic carbon content in weight percent, C/N ratio and rooting.

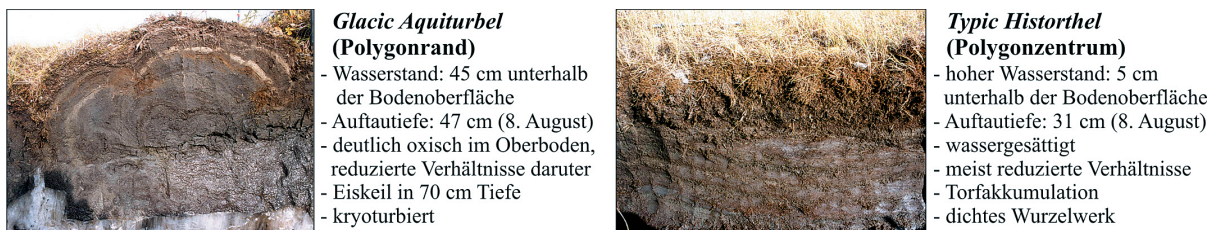


Abb. 13: Beispiele permafrostbeeinflusster Böden auf der Insel Samoylov im Lena-Delta mit Kurzbeschreibung der Bodeneigenschaften. Der dargestellte Bodenkomplex – bestehend aus „Glacic Aquiturbels“ und „Typic Historthels“ – dominiert die Böden der Insel (vgl. Abb. 10).

Fig. 13: Two examples of permafrost-affected soils from Samoylov Island with a brief description of soil properties. The presented soil complex consisting of Glacic Aquiturbels and Typic Historthels dominates the soils of this island in the Lena River Delta (see Fig. 10).

PFEIFFER et al. 1997, FIEDLER et al. 2004, KUTZBACH et al. 2004, DESYATKIN & DESYATKIN 2006, ZUBRZYCKI et al. 2008, SANDERS et al. 2010) (vgl. Abb. 11, 12, 13 und Tab. 2).

Der Umsatz organischer Substanz im Boden und die damit verbundene Bildung von Treibhausgasen in feuchten Tundrengebieten Eurasiens wurden ebenfalls im Rahmen von Felduntersuchungen kleinräumig erforscht (WÜTHRICH et al. 1999, RIVKINA et al. 2007, KNOBLAUCH et al. 2008, WAGNER et al. 2009, LIEBNER et al. 2011, SHCHERBAKOVA et al. 2011). Die

Emissionen von Treibhausgasen wurden im nordsibirischen Lena-Delta seit 2000 zunächst über kleinskalige Haubenmessungen erfasst (KUTZBACH et al. 2004, SACHS et al. 2010) und später um Eddy-Kovarianz-Messungen erweitert (KUTZBACH et al. 2007, SACHS et al. 2008, WILLE et al. 2008). Die saisonal gemittelten über Haubenmessungen ermittelten Methan-Emissionen betragen zwischen 4,3 und 28 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ (KUTZBACH et al. 2004), bzw. zwischen 4,9 und 100 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ (SACHS et al. 2010). Die Eddy-Kovarianz-Messungen lieferten für die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid durch Respirationprozesse Ergebnisse in den Größenordnungen vom 0,01 bis 0,55 g CO₂ h⁻¹ m⁻² (KUTZBACH et al. 2007). Die Methanflüsse betragen 18,7-30 mg CH₄ m⁻² d⁻¹ für gemittelte tägliche Emissionen im Messzeitraum (SACHS et al. 2008, Wille et al. 2008).

Erste englischsprachige Arbeiten zur Erfassung der Kohlenstoffmengen in den permafrostbeeinflussten Böden der sibirischen Arktis liegen ebenfalls vor (GUNDELWEIN et al. 2007, ZUBRZYCKI et al. 2012). Ihre für kleine Räume Sibiriens ermittelten Ergebnisse sind mit denen aus anderen Gebieten vergleichbar (Tab. 1). Deutlich wird aber hierbei auch, dass Ungenauigkeiten bei globalen Hochrechnungen auftreten können, wenn die Datenlage einzelner Regionen unzureichend ist (ZUBRZYCKI et al. 2012). Die Kohlenstoff-Pools werden nicht nur in der sibirischen Arktis, sondern auch in der europäisch-russischen Arktis über Feldarbeiten erfasst und über Fernerkundungsmethoden auf größere Gebiete extrapoliert (MAZHITOVA et al. 2003, HUGELIUS & KUHR 2009, HUGELIUS et al. 2011).

Neben der sich auf die oberen 1 bis 3 m beschränkenden Untersuchung der Kohlenstoff-Pools in den permafrostbeeinflussten Böden ist die Untersuchung spezieller Permafrostercheinungen wie die der Sedimente der Yedoma-Landschaften wichtig. Die Untersuchungen sibirischer Regionen zeigen, dass diese Ablagerungen einen hohen gravimetrischen Gehalt an Kohlenstoff enthalten, der aber in seinem Gehalt je nach untersuchtem Standort starken Schwankungen unterliegt. Er liegt meist zwischen 1 Gew.-% und 4 Gew.-%, kann aber auch Werte von bis zu 17 Gew.-% erreichen, wenn torfige Lagen vorhanden sind (ZIMOV et al. 1997, ZIMOV et al. 2006a, ZIMOV et al. 2006b, SCHIRRMESTER et al. 2011, STRAUSS et al. eingereicht).

FORSCHUNGSBEDARF

Zur Klärung der großen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Kohlenstoffmengen in den permafrostbeeinflussten Böden muss eine erhebliche Anzahl neuer Datensätze zu Bodenprofilen und den in ihnen gespeicherten Kohlenstoffmengen aus den bislang unterrepräsentierten Gebieten der zirkumarktischen Region – insbesondere aus der sibirischen Arktis – erarbeitet werden, um die *Northern Circumpolar Soil Carbon Database* zu aktualisieren (KUHR et al. 2010). Dieses ist nur über eine Kombination von messenden Feldarbeiten mit modellierenden Arbeiten für die Permafrostgebiete, vor allem für den eurasischen und ganz speziell für den sibirischen Raum, zu erreichen. Wegen der lückenhaften Datenlage sollte dabei besonderer Augenmerk auf den Delta-Ablagerungen und den eisreichen Sedimenten der Yedoma-Landschaften (vgl. TARNOCAI et al. 2009) sowie aber auch auf den permafrostbeeinflussten Böden des Hügel- und Gebirgslandes

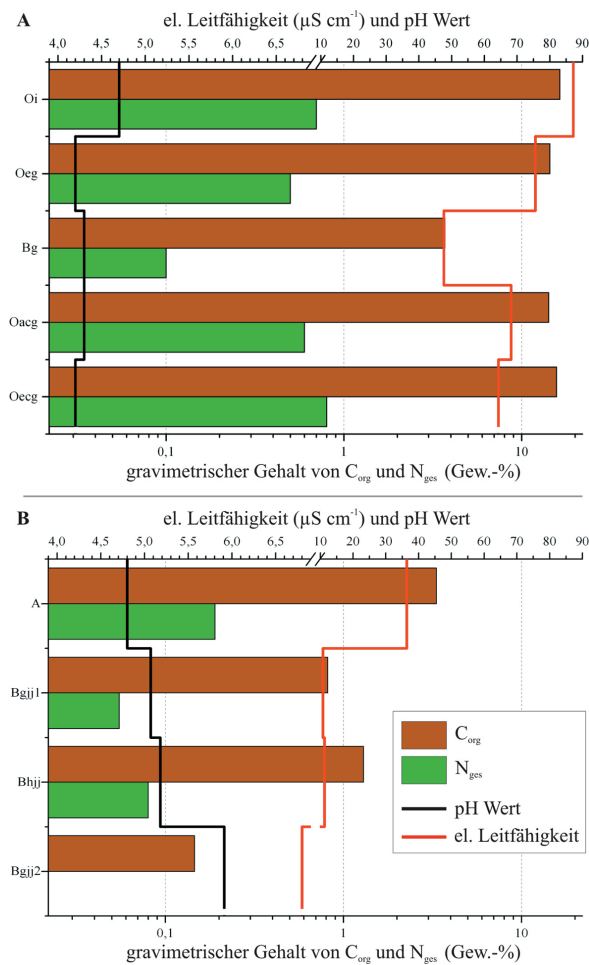


Abb. 12: Chemische Analysen der in Abb. 3 und 4 vorgestellten permafrostbeeinflussten Böden. A = Diagramm für den „Typic Historthel“. B = Diagramm für den „Typic Psammenturbel“. Beide Graphen sind für eine einfache Vergleichbarkeit gleich skaliert. Die obere Skala gilt für den pH Wert und die elektrische Leitfähigkeit (µS cm⁻¹). Beide Eigenschaften wurden in einer Bodensuspension aus Bodenprobe und Wasser gemessen. Die untere Skala gilt den Elementgehalten von Kohlenstoff und Stickstoff (Gew.-%), welche bei 900 °C im reinen O₂-Strom verbrannt und im CNS-Analysator quantifiziert wurden.

Fig. 12: Chemical analyses of in Figures 3 and 4 presented permafrost-affected soils. A = Chart for Typic Historthel. B = Chart for Typic Psammenturbel. For better comparison, both charts use the same scaling. The upper scale is for the pH value and electrical conductivity (µS cm⁻¹). Both properties were measured in a soil suspension of the soil sample and water. The scale at the bottom represents the gravimetric contents of carbon and nitrogen (wt.-%). These elements were combusted in pure O₂ stream at 900 °C and quantified in a CNS-analyzer.

liegen. Eine umfangreichere Datengrundlage ist unbedingt notwendig, um ein besseres Verständnis über die Interaktionen zwischen den besonderen Klima-, Boden- und Vegetationsbedingungen in den Permafrostgebieten zu erreichen. Aus diesen Informationen können dann Rückschlüsse auf die Faktoren der heute ablaufenden Prozesse und der in Zukunft stattfindenden Remobilisierung des labilen organischen Kohlenstoffs der permafrostbeeinflussten Böden gezogen werden.

Bei den zukünftigen Forschungsvorhaben ist es wichtig, eine hohe Interdisziplinarität der Forschenden in einem Gebiet zu erreichen, denn nur die Synthese der unterschiedlichen Forschungsansätze und ihrer Ergebnisse kann zu einem verbesserten Verständnis der permafrostbeeinflussten Böden und deren Kohlenstoffdynamik führen.

Da sowohl die Größe des Kohlenstoff-Pools in den permafrostbeeinflussten Böden regional variiert (McGUIRE et al. 2009) als auch seine rezente Quellen- und Senkenfunktion regional unterschiedlich ist, Feldforschung aber nicht überall in wünschenswert ausreichendem Umfang betrieben werden kann, sollten zunächst auf der Regionalebene großmaßstäbige thematische Bodentypenkarten erstellt werden. Diese in Karten dargestellten Ergebnisse könnten als Grundlage für zukünftige Hochrechnungen verschiedener Stoffflüsse verwendet werden.

Mit Hilfe hochaufgelöster Vegetations- und Bodentypenkarten von unterrepräsentierten Gebieten, welche Bodentextur und Bodenhydrologie beinhalten, lassen sich dann genauere Schätzungen des Kohlenstoff-Pools der zirkumpolaren Permafrostregion unter Zuhilfenahme von GIS-Analysen durchführen. Hierfür könnten viele schon vorhandene Boden- und Sedimentproben reanalysiert werden. Anschließend können gezielt neue Arbeitsgebiete gesucht werden, um Forschungslücken zu schließen.

Gezielt mittels Feld- und Laborarbeiten erhobene Daten zu den Kohlenstoff-Pools und den ablaufenden Prozessen in den Permafrostgebieten können in neue und verlässlichere Modelle integriert werden. Durch die synergetische interdisziplinäre Zusammenarbeit von messenden und modellierenden Permafrostforschern kann die Entwicklung dieser ausgedehnten Gebiete mit den riesigen Mengen an potentiell labilem organischem Kohlenstoff modelliert und Prognosen zu möglichen Treibhausgasemissionen aus permafrostbeeinflussten Böden erstellt werden. Diese sollten ihrerseits einen Beitrag zu neuen, realistischeren Projektionen der globalen Temperaturentwicklung führen und die derzeitige Unsicherheit über die Bedeutung der Kryosphäre einschließlich der Kohlenstoff-Pools in Permafrost beeinflussten Böden für das Klimasystem reduzieren.

DANKSAGUNG

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen bedanken, die uns geholfen haben diesen Beitrag zu erstellen. Unser Dank gebührt zuallererst dem technischen Laborpersonal des Instituts für Bodenkunde, insbesondere Frau S. Kopelke, für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Laboranalysen. Die Feldstudien fanden innerhalb der Expeditionen LENA 1999, LENA 2001, LENA 2009 statt, die gemeinsam

mit dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) und unseren russischen Partnern durchgeführt wurden. Besonderer Dank gebührt den Herren W. Schneider und G. Stoof vom AWI für logistische und technische Unterstützung sowie den Kollegen D. Bolshiyarov und M. Grigoriev vom Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), St. Petersburg und dem Melnikov-Permafrost-Institut, Jakutsk. Unser Dank geht auch an die Gutachter D. Thannheiser und L. Schirrmeister für ihre konstruktiven Anmerkungen zu diesem Artikel. Stilistische und orthografische Seiten des Textes haben K. Sanders und I. Preuss mit uns diskutiert, danke dafür. Diese Arbeit wurde vom Exzellenzcluster "CliSAP" (EXC 177) an der Universität Hamburg, finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), vom Deutschen Akademischen Austausch Dienst (DAAD) (PKZ: D/10/01863) und durch ein Promotionsstipendium der Universität Hamburg (HmbNFG) an S. Zubrzycki gefördert.

Literatur

- AG Boden* (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung („KA5“).- E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Altermann, M., Jäger, K.-D., Kopp, D., Kowalkowski, A., Kühn, D. & Schwanecke, W.* (2008): Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglazial bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre.- *Waldökologie Landschaftsforsch. Natursch.* 6: 5-42.
- Anisimov, O.A. & Nelson, F.E.* (1997): Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: results from transient general circulation models.- *Climatic Change* 35: 241-258.
- Baranov, I.Y.* (1959): Geographical distribution of seasonally-frozen ground and permafrost. *General Geocryology*. Obruchev Institute of Permafrost Studies. Acad. Sci. Moscow, Part 1, Chapter 7, National Council of Canada. Technical translation, 193-219.
- Barnes, D.L. & Chuvilin, E.* (2009): Migration of petroleum in permafrost-affected regions.- In: R. MARGESIN (ed), *Permafrost Soils*. Berlin: Springer Verlag, Berlin, 263-278.
- Beer, C.* (2008): Soil science: the Arctic carbon count.- *Nature Geosci.* 9: 569-570.
- Bliss, N.B. & Maursetter, J.* (2010): Soil organic carbon stocks in Alaska estimated with spatial and pedon data.- *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 74: 565-579.
- Bockheim, J.G.* (1979): Relative age and origin of soils in eastern Wright Valley, Antarctica.- *Soil Sci.* 128: 142-152.
- Bockheim, J.G.* (1995): Permafrost distribution in the southern circumpolar region and its relation to the environment – a review and recommendations for further research.- *Permafrost Periglac.* 6: 27-45.
- Bockheim, J.G.* (2002): Landform and soil development in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica: a regional synthesis.- *Arct. Antarct. Alp. Res.* 34: 308-317.
- Bockheim, J.G. & McLeod, M.* (2008): Soil distribution in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica.- *Geoderma* 144: 43-49.
- Corradi, C., Kollé, O., Walter, K., Zimov S.A. & Schulze E.D.* (2005): Carbon dioxide and methane exchange of a north-east Siberian tussock tundra.- *Global Change Biol.* 11: 1-16, doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01023.x.
- Desyatkin, R. & Teterina, L.* (1991): The soils of Lena River Delta. Genesis and melioration of Yakutian soils.- 55-66 (in Russian).
- Desyatkin, R.V. & Desyatkin, A.R.* (2006): Thermokarst transformation of soil cover on cryolithozone flat territories.- *Hokkaido Univ. Press*: 213-223.
- Dutta, K., Schuur, E.A.G., Neff, J.C. & Zimov, S.A.* (2006): Potential carbon release from permafrost soils of northeastern Siberia.- *Glob. Change Biol.* 12: 2336-2351.
- Elovskaya, L.G., Petrova, E.I. & Teterina, L.V.* (1979): Soils of northern Yakutia. - Novosibirsk, 1-303.
- Elovskaya, L.G.* (1987): Classification and diagnosis of permafrost soils of Yakutia.- Yakutsk, Russia, 1-172 (in Russian).
- FAO - Food and Agriculture Organization* (2007): WRB - World reference base for soil resources 2006. First update 2007. FAO, Rom, 1-128. http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wrb2007_red.pdf
- Fiedler, S., Wagner, D., Kutzbach, L. & Pfeiffer, E.-M.* (2004): Element redistribution along hydraulic and redox gradients of low-centered polygons, Lena-Delta, northern Siberia.- *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68: 1002-1011.
- French, H.M.* (2007): The periglacial environment.- John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 1-458.

- Goryachkin, S.V. & Ignatenko, I.V. (2004): Cryosols of the Russian European North.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 185-208.
- Gracheva, R.G. (2004): Cryosols of the mountains of southern Siberia and far eastern Russia.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 231-252.
- Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camill, P., Tarnocai, C., Frolking, S., Schuur, E.A.G., Jorgenson, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Wickland, K.P., French, N., Waldrop, M., Bourgeois-Chavez, L. & Striegl, R.G. (2011): Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance.- J. Geophys. Res. Biogeosci. 116, G00K06, 1-23.
- Gundelwein, A., Müller-Lupp, T., Sommerkorn, M., Haupt, E.T., Pfeiffer, E.-M. & Wiechmann, H. (2007): Carbon in tundra soils in the Lake Labaz region of arctic Siberia.- Eur. J. Soil Sci. doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00908.x.
- Hugelius, G. & Kuhry, P. (2009): Landscape partitioning and environmental gradient analyses of soil organic carbon in a permafrost environment.- Global Biogeochem. Cycles 23: GB3006. DOI:10.1029/2008GB003419
- Hugelius, G., Kuhry, P., Tarnocai, C. & Virtanen, T. (2010): Soil organic carbon pools in a periglacial landscape: a case study from the Central Canadian Arctic.- Permafrost Periglac. Processes 21: 16-29.
- Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., Pastukhov, A., Rivkin, F., Marchenko, S., Romanovsky, V. & Kuhry, P. (2011): High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic.- J. Geophys. Res.-Biogeosci. 116: G03024, 1-14.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007 - IPCC Fourth Assessment Report.- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Ivanova, E.N. (1965): Taiga cryogenic soils of northern Yakutia.- Pochvovedenie (Soil Science) No.7: 1-14.
- Ivanova, E.N. (1971): Soils of Central Yakutia.- Pochvovedenie (Soil Science) 9: 3-18.
- Jones, A., Stolbovoy, V., Tarnocai, C., Broll, G., Spaargaren, O. & Montanarella, L. (ed) (2010): Soil atlas of the northern circumpolar region.- European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg: 1-144. http://eusols.jrc.ec.europa.eu/library/maps/Circumpolar/Documents/Circumpolar_atlas.pdf
- Karavaeva, N.A. (1969): Tundra soils of Northern Yakutia.- Moscow: Nauka (Science), 1-206.
- Karavaeva, N. (2004): Cryosols of Western Siberia.- In: J.M. Kimble (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 209-230.
- Khvorostyanov, D.V., Krinner, G. & Ciais, P. (2008): Vulnerability of permafrost carbon to global warming. Part I. Model description and role of heat generated by organic matter decomposition.- Tellus 60B: 343-358.
- Kimble, J.M. (ed) (2004): Cryosols. Permafrost-Affected Soils.- Springer Verlag, Berlin, 1-726.
- Knoblauch, C., Zimmermann, U., Blumenberg, M., Michaelis, W. & Pfeiffer, E.-M. (2008): Methane turnover and temperature response of methane-oxidising bacteria in permafrost-affected soils of northeast Siberia.- Soil Biol. Biochem. 40: 3004-3013.
- Koven, C.D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. & Tarnocai, C. (2011): Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming.- PNAS 108 36: 14769-14774.
- Krasuk, A.A. (1927): Soils of Lensk-Amginsk drainage-basin (Yakutsk district). Materials of the committee of Yakutsk ASSR. Issue of Academy of Science SSR, Moscow, 1-176.
- Krautblatter, M. & Hauck, Chr. (2012): Neue Forschungsansätze zur räumlichen und zeitlichen Dynamik des Gebirgspermafrosts und dessen Naturgefahrenpotentials.- Polarforschung 81: 57-68.
- Kuhry, P., Dorrepaal, E., Hugelius, G., Schuur, E.A.G. & Tarnocai, C. (2010): Potential remobilization of belowground permafrost carbon under future global warming.- Permafrost Periglac. Process. 21: 208-214.
- Kutzbach, L., Wagner, D. & Pfeiffer, E.-M. (2004): Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra, Lena-Delta, Northern Siberia.- Biogeochem. 69: 341-362.
- 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.
- Lembke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, L., 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), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY.
- Lenton, T.M. & Schellnhuber, H.J. (2010): Tipping elements: jokers in the pack.- In: K. Richardson et al. (eds), Climate Change: Global Risks, Challenges, and Decisions. Cambridge University Press, Cambridge, 163-201.
- Liebner, S., Zeyer, J., Wagner, D., Schubert, C., Pfeiffer, E.-M. & Knoblauch, C. (2011): Methane oxidation associated with submerged brown mosses reduces methane emissions from Siberian polygonal tundra.- J. Ecol. 99: 914-922.
- Margesin, R. (ed) (2009): Permafrost Soils.- Springer Verlag, Berlin, 1-348.
- Matsuura, Y. & Yefremov, D.P. (1995): Carbon and nitrogen storage of soils in a forest-tundra area of northern Sakha, Russia.- In: Proceed. 3rd Sympos. Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994, 97-101. Forest & Forest Products Res. Unit, Univ. Sapporo.
- Maximovich, S.V. (2004): Geography and ecology of cryogenic soils of Mongolia.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols, Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 253-274.
- Mazhitova, G.G., Kazakov, V.G., Lopatin, E.V. & Virtanen, T. (2003): Geographic information system and soil carbon estimates for the Usa River basin, Komi Republic.- Eur. Soil Sci. 36: 123-135.
- McGuire, A.D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann, M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W. & Roulet N. (2009): Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change.- Ecol. Monogr. 79: 523-555.
- Nadelhoffer, K.J., Shaver, G.R., Giblin, A. & Rastetter, E.B. (1997): Potential impacts of climate change on nutrient cycling, decomposition and productivity in Arctic ecosystems.- Global Change Arctic Terrest. Ecosystems.- Ecological Studies 124: 349-364.
- Naumov, Ye.M. (2004): Soils and Soil Cover of Northeastern Eurasia. In: Kimble, J.M. (Hrsg.). Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 161-184.
- Oechel, W.C. & Billings, W.D. (1992): Effects of global change on the carbon balance of Arctic plants and ecosystems.- Arctic Ecosystems in a Changing Climate: 139-168. Academic Press, San Diego, CA.
- Oechel, W.C., Hastings, S.J., Vourlitis, G., Jenkins, M., Riechers, G. & Grulke, N. (1993): Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source.- Nature 361: 520-523.
- Oechel, W.C., Vourlitis, G.L., Hastings, S.J., Zulueta, R.C., Hinzman, L. & Kane, D. (2000): Acclimation of ecosystem CO2 exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming.- Nature 406: 978-981.
- Okoneshnikova, M.V. (1994): Humus of alas soils of Lena-Amginsk interfluvies.- Dissertation abstract, Novosibirsk, 1-147.
- Orlov, D.S., Biryukova, O.N. & Sakhanova N.I. (1996): Soil organic matter of Russia.- Nauka, ISBN 5-02-003643-9, 1-256. (in Russian)
- Ozerskaya, S., Kochkina, G., Ivanushkina, N. & Gilichinsky, D. (2009): Fungi in Permafrost.- In: R. Margesin (ed), Permafrost Soils. Springer Verlag, Berlin, 85-96.
- Panikov, N.S. (2009): Microbial activity in frozen soils.- In: R. MARGESIN (ed), Permafrost Soils. Springer Verlag, Berlin, 119-148.
- Pfeiffer, E.-M. & Janssen, H., (1992): C-isotope analysis of permafrost soil samples of NE-Siberia.- In: Joint Russian-American Seminar on Cryopedology and Global Change. GILICHINSKY, D.A. (ed). Pushchino: Pushchino Research Center, Russian Acad. Sci.
- Pfeiffer, E.-M. (1998) Methanfreisetzung aus hydromorphen Böden verschiedener naturnaher und genutzter Feuchtgebiete (Marsch, Moor, Tundra, Reisanbau).- Hamburg bodenkundl. Arbeiten 37: 1-208.
- Pfeiffer, E.-M., Gundelwein, A., Becker, H. & Mueller-Lupp, T. (1997): Soil organic matter (SOM) studies at Taimyr Peninsula.- Polar Res 237: 113-126.
- Pfeiffer, E.-M., Wagner, D., Becker, H., Vlasenko, A., Kutzbach, L., Boike, J., Quass, W., Kloss, W., Schulz, B., Kurchatova, A., Pozdnyakov, V. & Akhmad-deeva, I. (2000): Modern processes in permafrost affected soils.- Reports Polar & Mar. Res. 354: 22-54.
- Pfeiffer, E.-M., Wagner, D., Kobabe, S., Kutzbach, L., Kurchatova, A., Stoof, G. & Wille, C. (2002): Modern processes in permafrost affected soils.- Reports Polar & Mar. Res. 426: 21-41.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J. & Stangenberger, A.G. (1982): Soil carbon pools and world life zones. Nature 298: 156-159.
- Post, W.M. (2006): Organic matter, global distribution in world ecosystems.- In: R. LAL (ed), Encyclopedia of Soil Science, 2nd Ed., Taylor & Francis, New York, 1216-1221.
- Ping, C.L., Michaelson, G.J. & Kimble, J.M. (1997): Carbon storage along a latitudinal transect in Alaska.- Nutrient Cycling in Agroecosystems 49: 235-242.
- Ping, C.-L., Clark, M.H. & Swanson, D.K. (2004a): Cryosols in Alaska. In: J.M. Kimble (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin 71-94.
- Ping, C.-L., Qiu, G. & Zhao, L. (2004b): The periglacial environment and distribution of cryosols in China.. In: J.M. KIMBLE, (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 275-290.
- Ping, C.L., Michaelson, G.J., Jorgenson, M.T., Kimble, J.M., Epstein, H., Romanovsky, V.E. & Walker, D.A. (2008): High stocks of soil organic carbon in the North American Arctic region.- Nature Geosci. 1: 615-619.
- Ping, C.L., Michaelson, G.J., Kane, E.S., Packee, E.C., Stiles, C.A., Swanson, D.K. & Zaman, N.D. (2010): Carbon stores and biogeochemical

- properties of soils under black spruce forest, Alaska.- Soil Sci. Soc. Amer. J. 74: 969-978.
- Rivkina, E., Shcherbakova, V., Laurinavichius, K., Petrovskaya, L., Krivushin, K., Kraev, G., Pecheritsina, S. & Gilichinsky, D. (2007): Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost.- FEMS Microbiol. Ecol. 61: 1-15.
- Rozhkov, V.A., Wagner, V.B., Kogut, B.M., Konyushkov, D.E., Nilsson, S., Sheremet, V.B. & Shvidenko, A.Z. (1996): Soil carbon estimates and soil carbon map for Russia. Working Paper WP-96-60. Internat. Inst. Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Sachs, T., Wille, C., Boike, J. & Kutzbach, L. (2008): Environmental controls on CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena River.- J. Geophys. Res.-Biogeosci. 113: G00A03: 1-12.
- Sachs, T., Giebel, M., Boike, J. & Kutzbach, L. (2010): Environmental controls on CH₄ emission from polygonal tundra on the micro-site scale in the Lena River Delta, Siberia.- Global Change Biol. 16: 3096-3110. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02232.x.
- Sanders, T., Fiencke, C. & Pfeiffer, E.-M. (2010): Small-scale variability of dissolved inorganic nitrogen (DIN), C/N ratios and ammonia oxidizing capacities in various permafrost affected soils of Samoylov Island, Lena River Delta, Northeast Siberia.- Polarforschung 80: 23-35.
- Schirrmeister, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P.P., Strauss, J., Schuur, E.A.G. & Hubberten, H.-W. (2011): Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic.- J. Geophys. Res. 116: G00M02, 16 pp.
- Schirrmeister, L., Siegert, Chr. & Strauß, J. (2012): Permafrost ein sensibles Klimaphänomen.- Polarforschung 81: 8-10.
- Schuur, E., Bockheim, J., Canadell, J., Euskirchen, E., Field, C. & Goryachkin, S. (2008): Vulnerability of permafrost carbon to climate change: implications for the global carbon cycle.- Biogeosci. 5: 701-714.
- 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, Chr. & Zubrzycki, S. (2012): Eigenschaften des antarktischen Permafrosts.- Polarforschung 81: 47-55.
- Shi Y. (ed) (1988): Map of snow, ice and frozen ground in China (1:4000000), with explanatory notes.- China Cartographic Publishing House, Peking.
- Shishov, L., Tonkonogov, V., Lebedeva, I., Gerasimova, M. & Krasilnikov, P. (2004): Russian soil classification system: second approximation.- Moscow, 1-342.
- Shcherbakova, V., Rivkina, E., Pecheritsyna, S., Laurinavichius, K., Suzina, N. & Gilichinsky, D. (2011): Methanobacterium arcticum sp. nov., a methanogenic archaeon from Holocene Arctic permafrost.- Internat. J. Systematic Evol. Microbiol. 61: 144-147.
- Smith, C.A.S. & Veldhuis, H. (2004): Cryosols of the boreal, subarctic, and western cordillera regions of Canada.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin 119-138.
- Soil Survey Staff (2010): Keys to soil taxonomy. US Dept. Agriculture & Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C: 1-329. ftp://ftp.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/2010_Keys_to_Soil_Taxonomy.pdf
- Sokolov, I.A., Ananko, T.V. & Konyushkov, D.Ye. (2004): The soil cover of Central Siberia.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 303-338.
- Stolbovoi, V. (2002): Carbon in Russian soils. Climatic change, 55: 131-156.
- Strauss, J., Schirrmeister, L., Wetterich, S., Borchers, A. & Davydov, S.P. (eingereicht): Grain-size properties and organic-carbon stock of northeast Siberian Ice Complex (Yedoma) permafrost from the Kolyma lowland, north-eastern Siberia.- Global Biogeochem. Cycles.
- Targulyan, V.O. (1971): Soil formation and weathering in cold humid zones.- Moscow, 1-267.
- Tarnocai, C. & Smith, C.A.S. (1992): The formation and properties of soils in the permafrost regions of Canada.- In: D.A. GILICHINSKY (ed), Cryosols: the effect of cryogenesis on the processes and peculiarities of soil formation. Proceed. 1st Internat. Conf. Cryopedol., November 10-16, Pushchino, Russian Acad. Sci., 21-42.
- Tarnocai, C. & Ballard, M. (1994): Organic carbon in Canadian soils.- In: R. Lal, J.M. Kimble & E. Levine (eds), Soil Processes and Greenhouse Effect, US Soil Conservation Service, Lincoln, 31-45.
- Tarnocai, C., Kimble, J. & Broll, G. (2003): Determining carbon stocks in cryosols using the northern and mid latitudes soil database.- In: M. PHILLIPS, S. SPRINGMAN & L.U. ARENSON (eds), Permafrost Vol. 2: 1129-1134.
- Tarnocai, C. (2004): Cryosols of Arctic Canada.- In: J.M. KIMBLE (ed), Cryosols. Permafrost-Affected Soils. Springer Verlag, Berlin, 95-118.
- Tarnocai, C., Swanson, D., Kimble, J. & Broll, G. (2007): Northern circumpolar soil carbon database, digital database. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Canada. <http://wms1.agr.gc.ca/NortherCircumpolar/northercircumpolar.zip>
- 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: 11pp.
- 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.
- van Everdingen, R.O. (ed) (1998, revised 2005): Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. <http://nsidc.org/fgdc/glossary/>
- Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A. & Boelhouwers, J. (2010): Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the International Polar Year 2007-2009.- Permafrost Periglac. 21: 182-197.
- Wagner, D., Gattinger, A., Embacher, A., Pfeiffer, E.-M., Schloter, M. & Lipski, A. (2007): Methanogenic activity and biomass in Holocene permafrost deposits of the Lena Delta, Siberian Arctic and its implication for the global methane budget.- Global Change Biol. 13: 1089-1099.
- Wagner, D., Kobabe, S. & Liebner, S. (2009): Bacterial community structure and carbon turnover in permafrost-affected soils of the Lena Delta, northeastern Siberia.- Canad. J. Microbiol. 55: 73-83.
- Wagner, D. & Liebner, S. (2009): Global warming and carbon dynamics in permafrost Soils: methane production and oxidation.- In: R. MARGESIN (ed), Permafrost Soils. Springer Verlag, Berlin, 219-236.
- Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D. & Pfeiffer, E.-M. (2008): Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: eddy covariance measurements and modeling.- Global Change Biol. 14: 1395-1408.
- Wüthrich, C., Möller, I. & Thannheiser, D. (1999): CO₂-fluxes in different plant communities of a high-Arctic tundra watershed (Western Spitsbergen).- J. Vegetation Sci. 10: 413-420.
- 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. ZEITLINGER (eds), Proceed. 8th Internat. Conf. Permafrost, Zürich, 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., Voropaev, Y.V., Semiletov, I.P., Davidov, S.P., Prosiannikov, S.F., Chapin, F.S., Chapin, M.C., Trumbore, S. & Tyler, S. (1997): North Siberian lakes: a methane source fuelled by Pleistocene carbon.- Science 277: 800-802.
- Zimov, S.A., Schuur, E.A.G. & Chapin, F.S. III. (2006a): Permafrost and the Global Carbon Budget.- Science 312: 1612-1613.
- Zimov, S.A., Davydov, S.P., Zimova, G.M., Davydova, A.I., Schuur, E.A.G., Dutta, K. & Chapin III, F.S. (2006b): Permafrost carbon: stock and decomposability of a globally significant carbon pool.- Geophys. Res. Lett. 33: L20502, doi:10.1029/2006GL027484.
- Zubrzycki, S., Wetterich, S., Schirrmeister, L., Germogenova, A. & Pfeiffer, E.-M. (2008): Iron-oxides and pedogenesis of modern gelsols and paleosols of the southern Lena Delta, Siberia, Russia.- In: D.L. KANE & K.M. HINKEL (eds), Proceed. 9th Internat. Conf. Permafrost, Univ. Alaska Fairbanks, Institute of Northern Engineering, 2095-2100.
- Zubrzycki, S., Kutzbach, L., Vakhrameeva, P. & Pfeiffer, E.-M. (2012): Variability of soil organic carbon stocks of different permafrost soils: initial results from a north-south transect in Siberia.- In: K.M. HINKEL (ed), Proceedings of the 10th Internat. Conf. Permafrost, Salekhard.