

### 3.3 Terrestrischer und submariner Permafrost in der Arktis

LARS KUTZBACH, PAUL OVERDUIN, EVA-MARIA PFEIFFER,  
SEBASTIAN WETTERICH & SEBASTIAN ZUBRZYCKI

**Terrestrischer und submariner Permafrost in der Arktis:** Permafrost, also Locker- und Festgestein sowie Bodenmaterial, das dauerhaft Temperaturen unter 0 °C aufweist, unterlagert und beeinflusst große Teile der Landoberflächen der Erde. Außerdem findet sich submariner Permafrost großflächig unter dem Meeresgrund der Schelfmeere des arktischen Ozeans. Die vom Permafrost beeinflussten Gesteine und Böden spielen eine wichtige Rolle im Klimasystem und in den biogeochemischen Zyklen der Erde, da sie erhebliche Mengen an Süßwasser als Grundeis und sehr große Mengen Kohlenstoff in toter organischer Substanz speichern. Auch fungiert Permafrost als Reservoir und undurchlässige Grenzschicht für methanhaltige Gaseinschlüsse und feste Gashydrate. Es wird angenommen, dass die ausgeprägte arktische Klimaerwärmung zu einer Degradation des Permafrostes, einer Mobilisierung von Kohlenstoff und Nährelementen und zur Freisetzung von Treibhausgasen führt. Um die Fragen zu beantworten, in welchem Maße dieses Szenario eintreten wird und wie man den Konsequenzen begegnen kann, ist eine Intensivierung der internationalen Forschungsanstrengungen zum Permafrost notwendig.

**Terrestrial and submarine permafrost in the Arctic:** Permafrost, which is loose and solid rock or soil material that has temperatures permanently below 0 °C, lies beneath and influences large parts of Earth's land surfaces. Furthermore, large areas of submarine permafrost are found below the seafloor of the shelf seas of the Arctic Ocean. Permafrost-affected rocks and soils play an important role in the climate system and in the biogeochemical cycles of the Earth since they store a substantial volume of freshwater as ground ice and very large amounts of carbon contained in dead organic matter. Permafrost also, acts as a reservoir and impermeable layer for CH<sub>4</sub>-containing gas inclusions and hydrates. It is assumed that the pronounced arctic warming will lead to permafrost degradation, mobilization of carbon and nutrients and the release of greenhouse gases. An intensification of international research efforts on permafrost is necessary in order to answer questions to what degree this scenario will happen and how people may counteract its consequences.

#### Was ist Permafrost?

Neben den Eisschilden, den Gletschern, dem Meereis und den saisonalen Schneedecken ist der Permafrost eine wichtige Komponente der Kryosphäre (VAUGHAN et al. 2013). Permafrost bezeichnet Locker- und Festgestein sowie Bodenmaterial, das über mindestens zwei aufeinander folgende Jahre durchgehend kryotische Bedingungen, d.h. Temperaturen unter 0 °C, aufweist (VAN EVERDINGEN 1998, FRENCH 2007). Permafrost ist also ein klimatisch bedingtes Phänomen, das in Klimazonen mit mittleren Jahrestemperaturen unter 0 °C sowohl in den hohen Breiten als auch in großer Höhe in den Gebirgen (s. HAUCK Kap. 3.4, in diesem Band) auftritt. Der Permafrost enthält erhebliche Mengen an gefrorenem Süßwasser. So schätzen ZHANG et al. (2000) das Volumen des Grundeises der Permafrostgebiete der Nordhalbkugel auf 10,8 bis 35,5×10<sup>3</sup> km<sup>3</sup>, was einem Meeresspiegel-Äquivalent von 3 bis 9 cm entspricht. Während sich der terrestrische Permafrost auf den Landmassen befindet und im direkten Stoff- und Energieaustausch mit saisonal auftauenden Böden, der Vegetation und der Atmosphäre steht, liegt der sogenannte submarine Permafrost unter dem Meeresgrund und wird somit stark durch den Stoff- und Energieaustausch mit den darüber liegenden Meeressedimenten und der Meeresswassersäule beeinflusst. Der bei weitem überwiegende Anteil der globalen gletscherfreien Permafrostfläche befindet sich auf der Nordhalbkugel.

Hier unterliegt terrestrischer Permafrost 13 bis 18% (12 Mio. bis 17 Mio. km<sup>2</sup>) der gletscherfreien Landoberfläche Eurasiens und Nordamerikas (Abb. 3.3-1; ZHANG et al. 2000). Die terrestrische unvergletscherte Permafrostregion wird entsprechend der flächenhaften Permafrostverbreitung in Zonen von kontinuierlichem (90-100%), diskontinuierlichem (50-90%), sporadischem (10-50%) und inselartigem (0-10%) Permafrost untergliedert (BROWN et al. 1997). Submariner Permafrost kommt ausschließlich am Grund der kontinentalen Schelfmeere des Arktischen Ozeans vor (Abb. 3.3-1, OSTERKAMP 2001). Auf der Südhalbkugel kommt Permafrost in vergleichsweise kleiner Flächenausdehnung in den gletscherfreien Gebieten der Antarktis (ca. 49.000 km<sup>2</sup>; VIEIRA et al. 2010) sowie in den Anden (s. HAUCK Kap. 3.4, in diesem Band) vor. Der unter den Eisschilden und Gletschern durchaus vorhandene Permafrost wird in diesen Flächenabschätzungen normalerweise nicht berücksichtigt, da er der direkten Beobachtung meist nicht zugänglich ist und die Klimawirkung der vergletscherten Gebiete durch die den subglazialen Permafrost überlagernden Gletschereismassen dominiert wird.

#### Die wichtige Rolle des Permafrosts im Klimasystem

Sowohl der terrestrische als auch der submarine Permafrost haben eine erhebliche Relevanz im globalen Kli-

masystem und für die globalen biogeochemischen Kreisläufe (BEER 2008, VAUGHAN et al. 2013). Von Permafrost beeinflusste Sedimente und Böden sind große Speicher toter organischer Substanz und damit von biologisch aktiven Elementen wie u.a. Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor. Diese organische Substanz wurde über viele Jahrtausende angereichert und gespeichert, weil der mikrobielle Abbau durch die niedrigen Temperaturen und vielerorts wassergesättigte und sauerstoffarme Bedingungen stark verlangsamt ist (Abb. 3.3-2).

Nach jüngsten Schätzungen sind ca. 1.100-1.500 Gt Kohlenstoff in den durch Permafrost beeinflussten Böden und Sedimenten der Kontinente der Nordhalbkugel gespeichert (HUGELIUS et al. 2014), also deutlich mehr Kohlenstoff als in der gesamten Vegetation der

Erde oder andererseits auch in der Atmosphäre enthalten ist. Außerdem wird der zirkumarktische Permafrost, insbesondere auch der submarine Permafrost, als erheblicher Speicher und gleichzeitig als undurchlässige Grenzschicht für methanhaltige Gaseinschlüsse und feste Gashydrate betrachtet, wobei die Schätzungen der in Gaseinschlüssen und Hydraten enthaltenen Methanmenge in und unter den Permafrostschichten mit 6 bis 195 Gt (MCGUIRE et al. 2009) bislang jedoch sehr unsicher sind. Da sich das Klima der Arktis schneller erwärmt als im globalen Mittel (ACIA 2005), werden starke Auswirkungen auf die Landschaftsentwicklung sowie den Energie- und Stoffhaushalt in den Permafrostgebieten erwartet. Eine stetig voranschreitende Erwärmung wird zu einem tieferen sommerlichen Auf-



Abb. 3.3-1: Permafrostzonen in der Zirkumarktis. Weite Bereiche der sibirischen Schelfmeere sind von submarinem Permafrost geprägt (aus WARNSIGNAL KLIMA: Die Polarregionen - Kap. Schirrmeister & Hubberten).

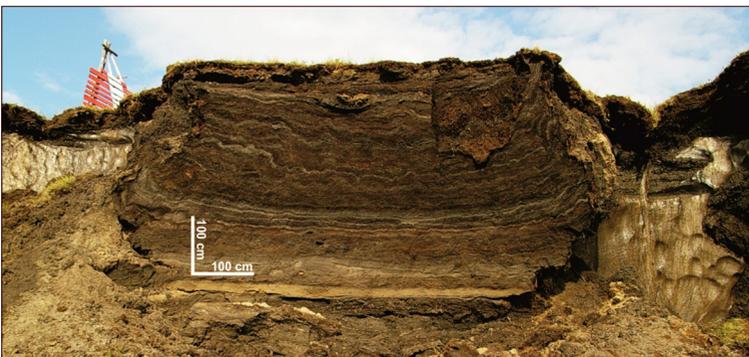
tauen der Böden und, einer Intensivierung von Thermokarst- und Thermoerosionsprozessen (s. OPEL & ULRICH Kap. 7.3, in diesem Band) sowie beschleunigter Küstenerosion in Permafrostgebieten führen. Diese Prozesse haben das Potential, große Mengen des bisher in der dauerhaft gefrorenen organischen Substanz gespeicherten Kohlenstoffs und Stickstoffs zu mobilisieren, was zur Mineralisierung dieser Elemente und ihrer Freisetzung als Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) führen kann. Auch ist ein verstärkter Austrag von in Wasser gelöstem Kohlenstoff und Nährelementen aus den Wassereinzugsgebieten mit degradierendem Permafrost in die aquatischen Ökosysteme zu erwarten. Zusätzlich kann eine Degradation des Permafrost zu einer verstärkten Freisetzung des im oder unter dem Permafrost in Gaseinschlüssen oder Hydraten festgelegten Methans führen. Da Kohlendioxid, Methan und Lachgas Treibhausgase sind, würde eine Erwärmung und Degradation des Permafrostes zu einer sich beschleunigenden Erderwärmung beitragen (Abb. 3.3-3). Es ist jedoch wichtig zu bemerken, dass es auch effektive ökologische Prozesse gibt, die einer klimawandelinduzierten Freisetzung von Treibhausgasen entgegenwirken können. So ist zum Beispiel bei einer Erwärmung mit einer verstärkten Photosyntheseleistung und Kohlendioxidaufnahme der Vegetation zu rechnen, und höhere Methanfreisetzungsraten können durch mikrobielle Methanoxidationsprozesse in den Auftauböden und den marinen Sedimenten in Grenzen gehalten werden (OVERDUIN et al. 2015a).

### Temperaturregime und Aggregatzustand des Permafrostes

Permafrost entsteht, wenn sich die über die langen und kalten Winter deutlich unter  $0\text{ }^\circ\text{C}$  abkühlenden Bodenschichten während des Sommers nicht wieder vollständig über  $0\text{ }^\circ\text{C}$  erwärmen können (VAN EVERDINGEN 1998). Die Mächtigkeit des Permafrostes, die in Sibirien bis zu 1,5 km erreichen kann, und das Tiefenprofil der Jahresmitteltemperaturen in den von Permafrost

beeinflussten Böden und Sedimenten werden durch das Gleichgewicht zwischen dem mittleren jährlichen Wärmeverlust des Bodens an seiner Oberfläche und dem Wärmegewinn durch den geothermischen Wärmefluss aus dem Erdinneren bestimmt. Die Oberflächenenergiebilanz ist wiederum beeinflusst durch eine Vielzahl von Faktoren, insbesondere durch Hanglage, Schneebedeckung, die thermischen Eigenschaften von Böden und Gestein, Vegetation, Häufigkeit von Bränden sowie das Vorhandensein von Wasser in Böden und an der Oberfläche (FRENCH 2007). Letzteres ist sehr wichtig für den Wärmehaushalt, weil Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität ( $4,19\text{ J}/[\text{g}\times^\circ\text{C}]$ ) hat, also viel Energie bei gegebener Temperaturänderung aufnehmen kann. Weiterhin wird viel latente Wärme beim Phasenwechsel von flüssigem zum festen Aggregatzustand von Wasser frei. Interessant ist, dass die Wärmeleitfähigkeit von Eis ( $2,18\text{ W}/[\text{m}\times^\circ\text{C}]$ ) deutlich größer als die von Wasser ( $0,57\text{ W}/[\text{m}\times^\circ\text{C}]$ ) ist, was den Wärmeverlust im Winter befördern kann. Dieser wird jedoch außerdem entscheidend durch die Bedeckung mit Schnee beeinflusst, der typischerweise eine geringe Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit seines Luftgehalts hat.

Im Allgemeinen sind die mittleren Jahrestemperaturen am tiefsten an der Oberfläche der Böden in den Permafrostgebieten, während sie mit der Tiefe ansteigen (Abb. 3.3-4). Im Jahresverlauf variiert die Temperatur im obersten Bereich der Böden am stärksten: Hier führt der starke Wärmeverlust an der Oberfläche im Winter zu sehr tiefen Temperaturen, während im Sommer die Wärmezufuhr an der Oberfläche zu einem starken Temperaturanstieg und Auftauen der obersten Bodenschichten führt. Mit zunehmender Tiefe werden diese jahreszeitlichen Schwankungen mehr und mehr gedämpft, und es lässt sich eine für den Standort spezifische Bodentiefe ohne saisonale Temperaturänderung bestimmen (typischerweise einige Meter bis Zehnermeter). Die sogenannte Permafrosttafel trennt den Permafrost von dem überliegenden Suprapermafrostboden, der im Sommer wärmer als  $0\text{ }^\circ\text{C}$  wird.

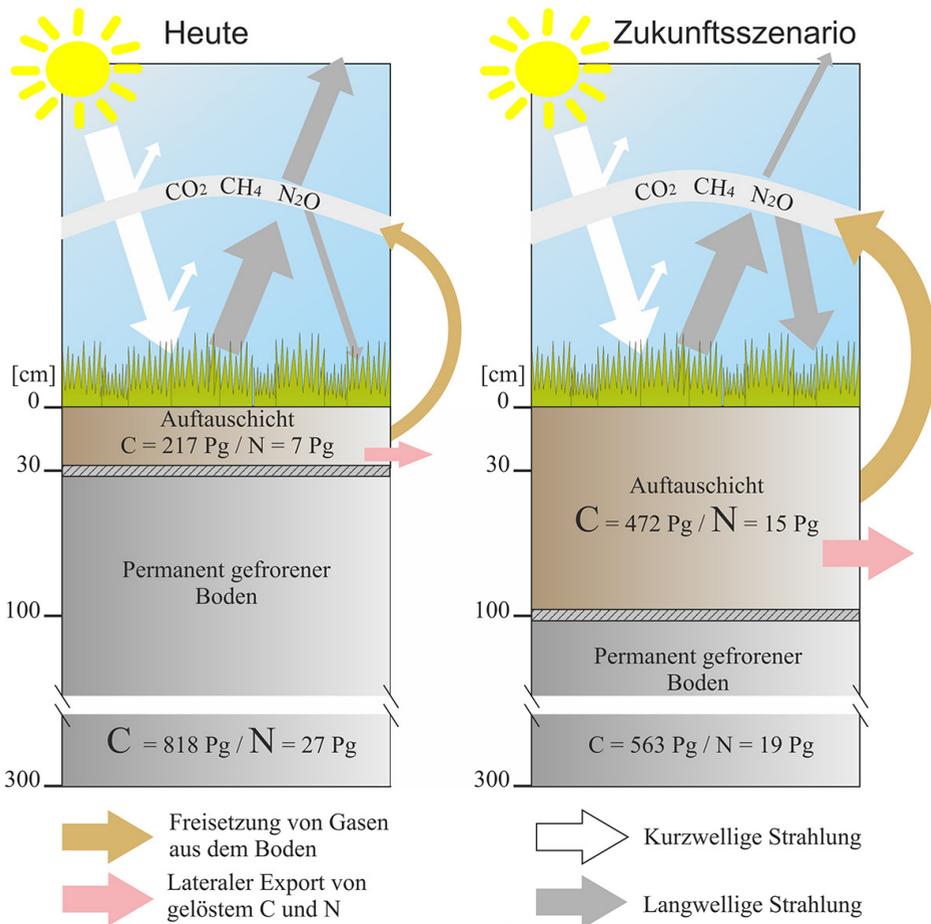


**Abb. 3.3-2:** Permafrostbeeinflusste Böden und Sedimente, aufgeschlossen an einem Erosionskliff an der Holozänen Terrasse des Lena-Deltas, Insel Samoylov ( $72^\circ22'\text{N}$ ,  $126^\circ30'\text{O}$ ). Im Zentrum des Bildes sind die torfreichen Lagen eines Kryosols im Zentrum eines Eiskeilpolygons zu erkennen. Seitlich des zentralen Bodenblocks befinden sich quer aufgeschlossene Eiskeile, die sich unter den Rändern der Eiskeilpolygone befinden. Foto: S. Zubrzycki (28.07.2007).

Permafrost wird nur als »gefroren« bezeichnet, wenn sein Porenwasser zum Teil oder in seiner Gesamtheit als Eis vorliegt (VAN EVERDINGEN 1998, FRENCH 2007). Man spricht dann auch von eiszementiertem Permafrost. Da der Gefrierpunkt von Wasser im Porenraum von Böden und Sedimenten wegen erhöhter Salzgehalte, erhöhtem Druck und Adsorptions- und Kapillarkräften erheblich erniedrigt sein kann, kann Permafrost auch eisfrei und »ungefroren« sein. Diese Unterscheidung zwischen »kryotischen« und »gefrorenen« (eiszementierten) Bedingungen ist insbesondere für den submarinen Permafrost wichtig, da hier aufgrund des Einflusses des salzigen Meereswassers mehrere Meter ungefrorene, eisfreie Permafrostsedimente über gefrorenen, eiszementierten Permafrostsedimenten liegen können (Abb. 3.3-6). Aber auch unter den dauerhaft gefrorenen Permafrostschichten

in terrestrischen Gebieten kann es durchaus mehrere Meter mächtige eisfreie Permafrostschichten (»basaler Kryopeg«; VAN EVERDINGEN 1998) aufgrund salzreichen Grundwassers (und erhöhten Druckes) geben. Wegen der Gefrierpunktniedrigung im Oberbodenbereich ist auch die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht (»active layer«) normalerweise etwas größer als die Tiefe der Permafrosttafel (Abb. 3.3-4).

Die Klimaerwärmung in der Zirkumarktis spiegelt sich bereits im Temperaturregime des Permafrostes wieder. Die Analyse von Temperaturprofilmessungen in 575 Permafrostbohrlöchern durch ROMANOVSKY et al. (2010) zeigt, dass sich der Permafrost seit den 1970er Jahren in den meisten arktischen Regionen erwärmt hat. Dabei hat sich kälterer Permafrost deutlich schneller erwärmt als Permafrost mit Temperaturen nahe 0 °C. Nach Mes-



Die Stärke der Pfeile deutet die Flussgröße an.

**Abb. 3.3-3:** Schematische Darstellung zur Rückkopplung der Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik ( $C$  = Kohlenstoff;  $N$  = Stickstoff) und den klimabedingten Änderungen in Kryosolen. A = Heutige Situation. B = Situation bei künftiger Klimaerwärmung. Verändert nach BEER (2008) und ZUBRZYCKI et al. (2014). Kohlenstoffpoolgrößen nach HUGELIUS et al. (2014). Stickstoffpoolgrößen über ein C/N-Verhältnis von 30 abgeschätzt.

sungen des CALM-Programms (*Circumpolar Active Layer Monitoring*) zeigen die Tiefen der sommerlichen Auftauschicht eine hohe interannuelle Variabilität, die mit den kumulierten Lufttemperaturen während der Auftauperiode korreliert (BROWN et al. 2000). Ein allgemeiner Trend zu mächtigeren sommerlichen Auftauschichten konnte aufgrund der bisher meist zu kurzen Messreihen noch nicht abgesichert werden. Jedoch konnte für einige Standorte, für die längere Messreihen vorliegen, eine signifikante Vertiefung der sommerlichen Auftauschicht festgestellt werden (BROWN et al. 2000, VAUGHAN et al. 2013).

**Permafrostbeeinflusste Böden - Kryosole**

In den Landschaften der terrestrischen Permafrostgebiete haben sich besondere Böden – die sogenannten Kryosole – ausgebildet (JONES et al.

2010). Kryosole werden nach dem internationalem Bodenklassifikationssystem »*World Reference Base for Soil Resources*« definiert als Böden, die innerhalb ihres obersten Meters Merkmale kryopedogener Prozesse und innerhalb von zwei Meter Bodentiefe dauerhaft ( $\geq$  zwei Jahre) gefrorene Horizonte aufweisen. Sind Merkmale kryopedogener Prozesse im oberen Bodenbereich nicht ausgeprägt, müssen dauerhaft gefrorene Horizonte schon innerhalb von einem Meter Bodentiefe angetroffen werden (IUSS WORKING GROUP WRB 2014). Wichtige kryopedogene Prozesse sind Kryoturbation (durch Gefrieren und Tauen und damit verbundene Dehnungs- und Kontraktionsprozesse verursachte Durchmischung und Verknetung von Bodenmaterial aus verschiedenen Bodenhorizonten), Eisseggregation und Eisakkumulation (Migration zu und Anfrieren von Wasser an bestehende Eislinen), Kryometamorphose (eisbedingte Umwandlung von Bodenstrukturen), Gelisolifluktion (langsames,

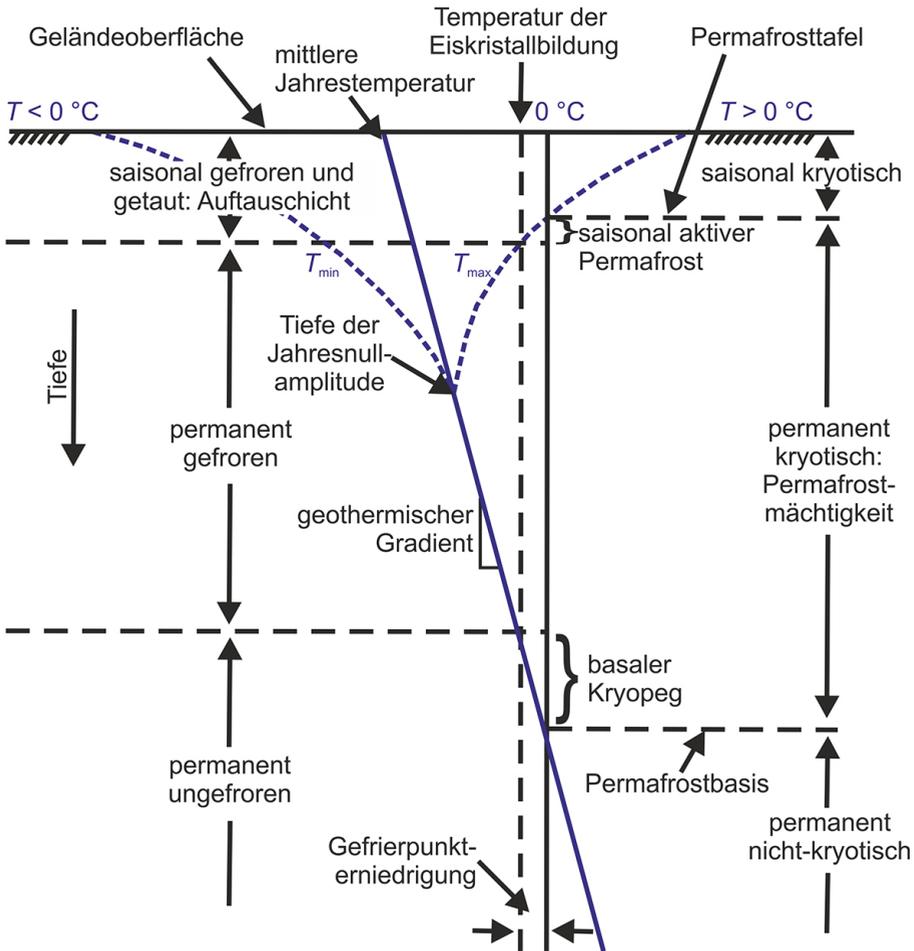
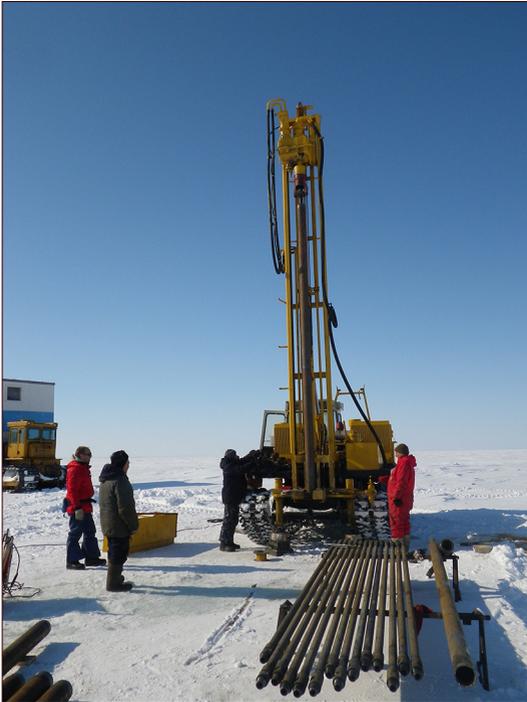


Abb. 3.3-4: Schema zum Temperaturregime und zum Aggregatzustand von permafrostbeeinflussten Böden. Verändert nach FRENCH (2007).



*Abb. 3.3-5: Bohrung von submarinem Permafrost vom Meereis aus, April 2012, Buor Khaya Bucht in der zentralen Lapteewsee (OVERDUIN et al. 2015a) (Foto: L. Schirrmeister).*

flächenhaftes Abwärtsfließen des Bodenmaterials der Auftauschicht an Hängen), Frosthebung, Frostsortierung sowie die Frostspaltenbildung bedingt durch die Kontraktion des gefrorenen Bodens bei sehr niedrigen Temperaturen (FRENCH 2007, ZUBRZYCKI et al. 2014).

Oft sind Kryosole durch hoch anstehendes Bodenwasser gekennzeichnet, da der unterliegende Permafrost wasserstauend wirkt. Aufgrund lang anhaltender Wassersättigung im Boden kommt es zu Sauerstoffarmut und reduzierenden Bedingungen, die zusätzlich zu den tiefen Temperaturen die mikrobielle Aktivität und damit den Abbau organischer Substanz behindern. So kann trotz der geringen Biomasseproduktion der arktischen Vegetation tote organische Substanz in den Böden angereichert und langfristig gespeichert werden. Kryoturbation trägt zu dieser Akkumulation von organischem Material bei, indem sie im Oberboden gebildete organische Substanz in tiefere, kältere und sauerstoffärmere Bodenbereiche einarbeitet, in denen der mikrobielle Abbau noch langsamer erfolgt. Weiterhin wird die langfristige Speicherung der organischen Substanz durch die in den arktischen naturnahen Gebieten oft sehr aktive fluviatile und äolische Sedimentation gefördert. Durch die Sedimentationsprozesse wird die Oberfläche der Kryosole stetig erhöht, was wiederum

zu einer entsprechenden Erhöhung der Permafrosttafel führt. Dabei werden die untersten Bereiche der sommerlichen Auftauschicht mit der in ihnen enthaltenen organischen Substanz in den Permafrost inkorporiert (ZUBRZYCKI et al. 2014).

Setzt sich die beobachtete Erwärmung des Permafrostes und Vertiefung der sommerlichen Auftauschicht fort, kann davon ausgegangen werden, dass bisher dauerhaft gefrorenes organisches Bodenmaterial besser verfügbar für den Abbau durch Bodenorganismen wird. Durch den Abbau werden die in der organischen Substanz enthaltenen Elemente teilweise mineralisiert und können gasförmig an die Atmosphäre (z.B. als Kohlendioxid, Methan oder Lachgas) oder gelöst an die aquatischen Ökosysteme (z.B. als Nitrat) transportiert werden. Es ist zu erwarten, dass diese Elementmobilisierung besonders stark ausfallen wird, wenn der Klimawandel nicht nur zu wärmeren sondern auch zu trockeneren Bedingungen in den Permafrostgebieten führen wird.

### **Submariner Permafrost**

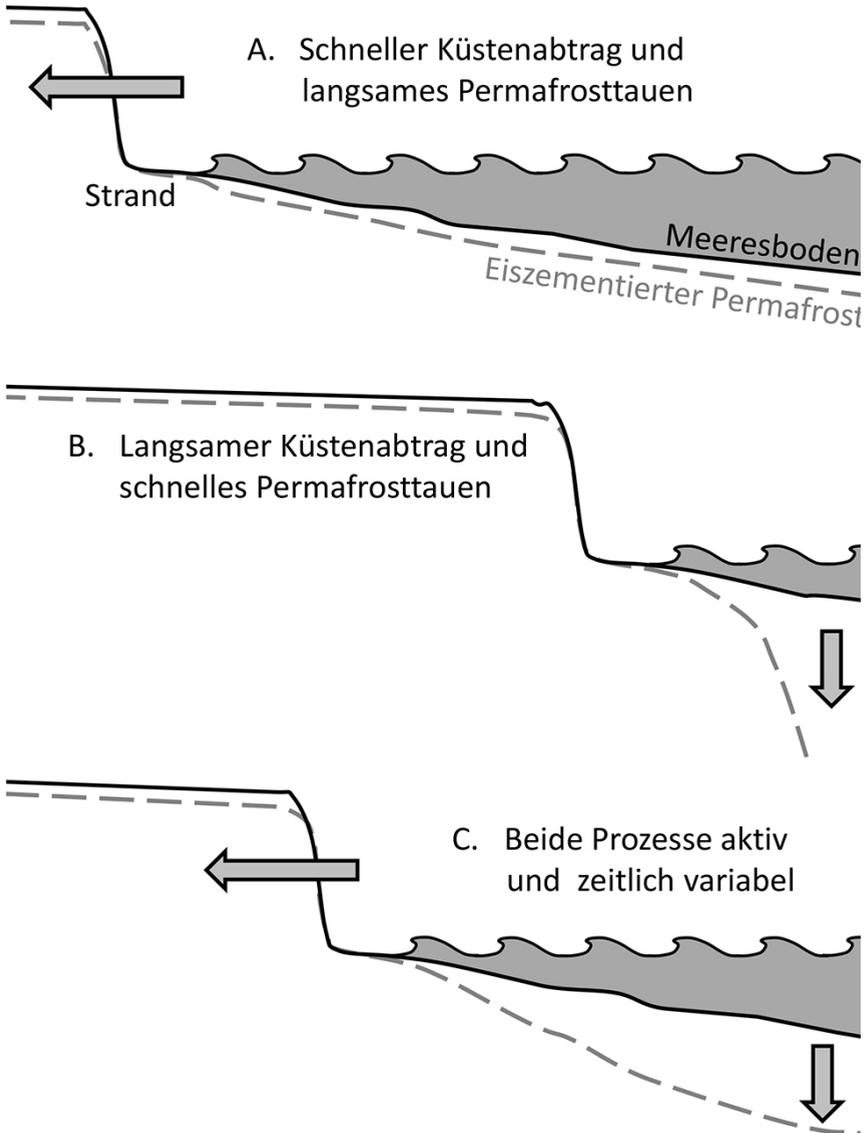
Der submarine Permafrost der Schelfmeere des Arktischen Ozeans wird generell als reliktscher terrestrischer Permafrost betrachtet, der nach Ende der letzten Kaltzeit überflutet wurde und seit dem durch Meerwassereinfluss degradiert. Auch während Perioden mit weitgehend stabilem Meeresspiegel (seit ca. 2.500 Jahren vor heute) wird terrestrischer Permafrost fortlaufend durch Küstenerosionsprozesse vom Meer überflutet (OVERDUIN et al. 2007). Permafrost kann sich aber auch unterhalb des Meeresbodens bilden, wenn dieser dicht unterhalb des Meeresspiegels liegt und das Sediment im Winter unterhalb des direkt aufliegenden Meereises gefriert.

Bedingt durch Meeresspiegelschwankungen und Küstenerosion reicht die heutige Verbreitung von submarinem Permafrost auf dem flachen arktischen Schelf von der Küste ca. bis zur 100-m-Wassertiefenlinie (100-m-Isobathe). Diese Distanz kann auf den flachen Schelfgebieten der arktischen Randmeere mehrere hundert Kilometer erreichen. Regionale Verbreitungskarten von submarinem Permafrost basieren auf der Mächtigkeit von terrestrischem Permafrost, der spätquartären Dynamik von Meeresspiegelschwankungen, Neotektonik, geothermalen Gradienten und Temperaturmodellierung. Submariner Permafrost taut (degradiert) von oben durch den thermischen und den chemischen Einfluss des Meerwassers, sowie von unten durch den geothermischen Fluss aus dem Erdinneren (ROMANOVSKII et al. 2004). Die einzige bislang existierende zirkum-arktische Verbreitungskarte von submarinem Permafrost nutzt dennoch die 80-m-Isobathe um

den ungefähren Meeresspiegeltiefststand während der letzten Eiszeit zu fassen und die potentielle Verbreitung von submarinem Permafrost abzubilden (BROWN et al. 1997; Abb. 3.3-1).

Submarine Permafrostvorkommen wurden durch wissenschaftliche Bohrkampagnen nachgewiesen.

Ein geophysikalischer Nachweis der Obergrenze von eiszementierten Sedimenten wurde durch seismische Reflektoren (REKANT et al. 2005) und hohen elektrischen Widerstand (OVERDUIN et al. 2012) erbracht. Küstennahe Permafrostdegradationsraten zwischen 1 cm und 20 cm pro Jahr wurden durch geophysikalische



**Abb. 3.3-6:** Die relativen Geschwindigkeiten von Küstenabtrag und Permafrostdegradation haben Einfluss auf die Mächtigkeit der ungefrorenen (eisfreien, kryotischen) Schicht oberhalb des eiszementierten submarinen Permafrostes. (A) schneller Küstenabtrag führt zu einer Grenzschicht zwischen eisfreiem und eiszementiertem Permafrost nah unterhalb des Meeresbodens; (B) eine relativ stabile Küste mit geringen Abtragsraten führt zu einer steileren Neigung der Grenzschicht und so zu einer mächtigeren Auflage von eisfreien Sedimenten; (C) in den meisten Fällen wird die Küsten- und Permafrostmorphologie eine zeitliche Variabilität von beiden Prozessen sowie den Einfluss der Permafrostegradationsdynamik widerspiegeln. Verändert nach OVERDUIN et al. (2015b).

Untersuchungen und Bohrkampagnen auf dem Ost-sibirischen Schelf (OVERDUIN et al. 2007) und in der Tschuktschensee vor Alaska (OVERDUIN et al. 2012) bestimmt. Ein Zusammenhang zwischen Küstenabtrag und der Degradation von submarinem Permafrost ist in *Abb. 3.3-6* vereinfacht dargestellt. Hohe Küstenerosionsraten bedingen dabei eine schnelle Überflutung von terrestrischem Permafrost, der dann unter den thermischen und chemischen Einflüssen des Meerwassers an seiner Oberfläche im submarinen Milieu degradiert. Die Grenze zwischen eiszementiertem und eisfreiem Permafrost verlagert sich somit in die Tiefe. Bei geringer Küstenerosion ist das seewärts gerichtete Gefälle der Permafrostobergrenze deutlich steiler (ca. 5%) und zeigt somit eine höhere Permafrostdegradationsrate als in Küstenbereichen mit hohen Abtragsraten (ca. 1%) (OVERDUIN et al. 2015b).

Die geothermische Degradation an der unteren Grenze des Permafrostes auf langen (Glazial-Interglazial) Zeitskalen ist für das Lapteewsee-Schelf unter anderen von ROMANOVSKII & HUBBERTEN (2001) modelliert worden. Die thermische Degradation an der oberen Grenze des submarinen Permafrostes hingegen hängt von der (steigenden) Temperatur des meeresbodennahen Meerwassers ab. DMITRENKO et al. (2011) nutzten eine Zeitreihe über 76 Jahre und ermittelten für die Lapteewsee eine Erwärmung des bodennahen Meerwassers von bis zu 2,1 °C in Küstennähe (für Wassertiefen von weniger als 10 m) seit 1985. Die Gründe dafür liegen in einer verringerten Meereisbedeckung und demzufolge erhöhter Sonneneinstrahlung in den verlängerten Sommerperioden. Ein Anstieg der Permafrostdegradationsrate durch Meerwassererwärmung wurde jedoch nicht direkt beobachtet.

Die stabile Zone für Gashydrate (*gas hydrate stability zone*) ist über das Vorkommen von submarinem Permafrost definiert. Modellierungsergebnisse sagen aus, dass Permafrost auf den sibirischen Schelfen in den letzten 400.000 Jahren überdauert hat. Messungen von Gaseinschlüssen in submarinem Permafrost des ostsibirischen Schelfs und hohe Methankonzentrationen in der Wassersäule und der oberflächennahen Atmosphäre (SHAKHOVA et al. 2014) lassen vermuten, dass Gas durch aufgetaute Bereiche im submarinen Permafrost freigesetzt wird und in den heutigen Kohlestoffkreislauf eingeht. Die aktuelle wissenschaftliche Diskussion dreht sich darum, ob die gemessenen Methanemissionsraten auf den arktischen Schelfmeeren ansteigen und wenn ja in welcher Größenordnung. Eine direkte Beziehung zur Degradation von submarinem Permafrost bleibt vorerst spekulativ. OVERDUIN et al. (2015a) zeigen, dass Methankonzentrationen im eishaltigen submarinen Permafrost deutlich höher sind als in den überlagernden eisfreien

Sedimenten und dass durch Tauen freigesetztes Methan noch im Sediment oxidiert wird, wobei Sulfat reduziert wird. Hohe Methankonzentrationen in der Wassersäule haben ihre Quelle demnach nicht im submarinen Permafrost. Die Verteilung und der Gehalt an organischem Kohlenstoff, Gas und Gashydraten in Schelfsedimenten jenseits der küstennahen Zone sind bislang wenig untersucht und stellen somit erhebliche Wissenslücken in unserem Verständnis der Rolle des submarinen Permafrostes im aktuellen Klimageschehen dar.

## Ausblick

In den letzten Jahren lag der Schwerpunkt der internationalen Permafrostforschung auf dem Energie-, Wasser- und Kohlenstoffhaushalt der terrestrischen Permafrostgebiete. Beispiele für große Verbundprojekte zu dieser Thematik sind das durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union geförderte Projekt PAGE21 (*Changing Permafrost in the Arctic and its Global Effects in the 21<sup>st</sup> Century*), das durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte deutsch-russische Kooperationsprojekt CARBOPERM (*Carbon in Permafrost: Formation, Turnover and Release*) oder das »Nordic Centre of Excellence« DEFROST (*Impact of a changing cryosphere – Depicting ecosystem-climate feedbacks from permafrost, snow and ice*) der skandinavischen Länder. Ähnlich ausgerichtete Verbundprojekte wurden in Nordamerika (z.B. das *Next-Generation Ecosystem Experiment* NGEA Arctic) und Japan (z.B. GRENE-TEA) durchgeführt. Da Klimaveränderungen sich auf Zeitskalen von mindestens mehreren Jahrzehnten abspielen, wäre es sehr wichtig, die innerhalb dieser Projekte angestoßenen Untersuchungen in langfristig angelegten, internationalen Permafrost-Monitoringprogrammen fortzuführen.

Neben dem Kohlenstoffhaushalt sollten in der Zukunft verstärkt die für biologische Prozesse wichtigen Nährstoffe Stickstoff und Phosphor in ihrer Bedeutung für Ökosysteme in Permafrostgebieten untersucht werden. Dabei wäre es wichtig, die Auswirkungen der Permafrostdegradation auf Pflanzen- und Tierökologie stärker als bisher in den Fokus zu rücken und biologische Untersuchungsansätze besser mit physikalischen und biogeochemischen Arbeiten zu verbinden. Weiterhin sollte angestrebt werden, die Wechselwirkungen zwischen den terrestrischen Permafrostgebieten und dem arktischen Ozean, die auf der einen Seite über atmosphärische Prozesse und auf der anderen Seite über den wassergetragenen Transport von Energie und Stoffen über die großen Flusssysteme eng miteinander gekoppelt sind, umfassender zu studieren. Großer Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den Fragen, wie empfindlich submariner Permafrost auf steigende ark-

tische Temperaturen, reduzierte Meereisbedeckung und sinkende Salinität im Meerwasser reagiert und wie sich eine Degradation des submarinen Permafrostes auf die Freisetzung von Methan auswirkt.

## Literatur

- ACIA (ARCTIC CLIMATE IMPACT ASSESSMENT) (2005): ACIA Scientific Report. Cambridge University Press, New York, USA.
- BEER, C. (2008): Soil science: the Arctic carbon count. *Nature Geosciences*, 9, 569-570.
- BROWN, J., O. J. J. FERRIANS, J. A. HEGINBOTTOM & E. S. MELNIKOV (1997): International Permafrost Association Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions, Scale 1:10,000,000. U.S. Geological Survey, Washington, DC, USA.
- BROWN, J., K. M. HINKEL & F. E. NELSON (2000): The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results 1. *Polar Geography*, 24(3), 166-258.
- DMITRENKO, I. A., S. A. KIRILLOV, B. TREMBLAY, H. KASSENS, O. A. ANISIMOV, S. A. LAVROV, S. O. RAZUMOV & M. N. GRIGORIEV (2011): Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 116, C10.
- FRENCH, H. M. (2007): The periglacial environment. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 458 S.
- HUGELIUS, G., J. STRAUSS, S. ZUBRZYCKI, J. W. HARDEN, E. A. G. SCHUUR, C.-L. PING, L. SCHIRRMEISTER, G. GROSSE, G. J. MICHAELSON, C. D. KOVEN, J. A. O'DONNELL, B. ELBERLING, U. MISHRA, P. CAMILL, Z. YU, J. PALMTAG & P. KUHR (2014): Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11, 6573-6593.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2014): World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, Italy.
- JONES, A., V. STOLBOVOY, C. TARNOCAL, G. BROLL, O. SPAARGAREN & L. MONTANARELLA (eds.) (2010): Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg: 144 S.
- MCGUIRE, A. D., L. G. ANDERSON, T. R. CHRISTENSEN, S. DALLIMORE, L. GUO, D. J. HAYES, M. HEIMANN, T. D. LORENSON, R. W. MACDONALD & N. ROULET (2009): Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs*, 79(4), 523-555.
- OSTERKAMP, T. E. (2001): Sub-sea permafrost. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press, New York, USA, pp. 2902-2912.
- OVERDUIN, P. P., H.-W. HUBBERTEN, V. RACHOLD, N. ROMANOVSKII, M. N. GRIGORIEV & M. KASYMSKAYA (2007): Evolution and degradation of coastal and offshore permafrost in the Laptev and East Siberian Seas during the last climatic cycle. *GSA Special Papers*, 426, 97-111.
- OVERDUIN, P. P., S. WESTERMANN, K. YOSHIKAWA, T. HABERLAU, V. ROMANOVSKY & S. WETTERICH (2012): Geoelectric observations of the degradation of nearshore submarine permafrost at Barrow (Alaskan Beaufort Sea). *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 117, F02004.
- OVERDUIN, P. P., S. LIEBNER, C. KNOBLAUCH, F. GÜNTHER, S. WETTERICH, L. SCHIRRMEISTER, H.-W. HUBBERTEN & M. N. GRIGORIEV (2015a): Methane oxidation following submarine permafrost degradation on the Central Laptev Shelf. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences*, 120(5), 965-978.
- OVERDUIN, P. P., S. WETTERICH, F. GÜNTHER, M. GRIGORIEV, G. GROSSE, L. SCHIRRMEISTER, H.-W. HUBBERTEN & A. MAKAROV (2015b): Coastal dynamics and subsea permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *The Cryosphere Discussions*, 9, 1-35.
- REKANT, P., G. CHERKASHEV, B. VANSTEIN & P. KRINITSKY, P. (2005): Submarine permafrost in the nearshore zone of the southwestern Kara Sea. *Geo-Marine Letters*, 25(2/3), 183-189.
- ROMANOVSKII, N. N. & H.-W. HUBBERTEN (2001): Results of permafrost modelling of the lowlands and shelf of the Laptev Sea Region, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(2), 191-202.
- ROMANOVSKII, N. N., H.-W. HUBBERTEN, A. V. GAVRILOV, V. E. TUMSKOY & A. L. KHOLODOV (2004): Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quaternary Science Reviews*, 23(11/13), 1359-1369.
- ROMANOVSKY, V. E., S. L. SMITH & H. H. CHRISTIANSEN (2010): Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: A synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 106-116.
- SHAKHOVA, N., I. SEMILETOV, I. LEIFER, V. SERGIENKO, A. SALYUK, D. KOSMACH, D. CHERNYKH, C. STUBBS, D. NICOLSKY, V. TUMSKOY & Ö. GUSTAFSSON (2014): Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 7, 64–70.
- VAN EVERDINGEN, R. (ed.) (1998): Revised May 2005. Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.
- VAUGHAN, D. G., J. C. COMISO, I. ALLISON, J. CARRASCO, G. KASER, R. KWOK, P. MOTE, T. MURRAY, F. PAUL, J. REN, E. RIGNOT, O. SOLOMINA, K. STEFFEN & T. ZHANG (2013): Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- VIEIRA, G., J. BOCKHEIM, M. GUGLIELMIN, M. BALKS, A. A. ABRAMOV, J. BOEL-HOUWERS, N. CANNONE, L. GANZERT, D. GILICHINSKY, S. GORYACHKIN, J. LÓPEZ-MARTINEZ, I. MEIKLEJOHN, R. RAFFI, M. RAMOS, C. SCHAEFER, E. SERRANO, F. SIMAS, R. SLETTEN & D. WAGNER (2010): Thermal State of Permafrost and Active-layer Monitoring in the Antarctic: Advances during the International Polar Year 2007–2009. *Permafrost Periglacial Processes*, 21, 182-197.
- ZHANG, T., J. A. HEGINBOTTOM, R. G. BARRY & J. BROWN (2000): Further statistics on the distribution of permafrost and ground-ice in the Northern Hemisphere. *Polar Geography*, 24, 126-131.
- ZUBRZYCKI, S., L. KUTZBACH & E.-M. PFEIFFER (2014): Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic. *Solid Earth*, 5, 595-609.

## Kontakt:

- Prof. Dr. Lars Kutzbach (lars.kutzbach@uni-hamburg.de)  
 Prof. Dr. Eva-Maria Pfeiffer (eva-maria.pfeiffer@uni-hamburg.de)  
 Dr. Sebastian Zubrzycki (sebastian.zubrzycki@uni-hamburg.de)  
 Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN)  
 Institut für Bodenkunde - Universität Hamburg  
 Dr. Paul Overduin (paul.overduin@awi.de)  
 Dr. Sebastian Wetterich (sebastian.wetterich@awi.de)  
 Alfred Wegener Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung - Sektion Periglazialforschung, Potsdam

Kutzbach, L., P. Overduin, E.-M. Pfeiffer, S. Wetterich & S. Zubrzycki (2015): Terrestrischer und submariner Permafrost in der Arktis. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 78-86. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.12