

1 KLIMAWANDEL IN SIBIRIEN – EINE REGION IM UMBRUCH

Renate Treffeisen und Klaus Grosfeld

Einführung

Der Klimawandel ist die wahrscheinlich größte Herausforderung unserer Zeit. Und längst handelt es sich dabei nicht mehr um ein rein theoretisches Problem der Zukunft. Denn jeder von uns spürt schon jetzt, dass sich die Lebensbedingungen auf der Erde massiv verändern. So häufen sich weltweit die Extremwetter-Ereignisse in Form von längeren Trocken- oder Dürrephasen, extremen Hitzewellen und Starkniederschlägen. Auch der Anstieg des Meeresspiegels bedroht unser Leben an den Küsten.

Nirgendwo auf der Erde aber ist der Klimawandel bereits heute so sichtbar wie in der Arktis. Denn die Jahresmitteltemperatur steigt hier schon jetzt doppelt so stark wie im weltweiten Durchschnitt. Grund dafür ist vor allem die Eis-Albedo-Rückkopplung. Das helle Meereis auf dem Arktischen Ozean reflektiert einen großen Teil der eingestrahnten Sonnenenergie zurück ins All. Die weltweit steigenden Temperaturen lassen das Eis nun schmelzen und legen die dunkle Meeresoberfläche darunter frei. Der Arktische Ozean absorbiert dadurch mehr Sonnenenergie und erwärmt sich. Daraufhin schmilzt das Meereis noch schneller und der Trend zu höheren Temperaturen verstärkt sich. Die Folgen sind sogar aus dem All zu sehen: Im Vergleich zu vor 40 Jahren schmilzt das arktische Meereis heute bis zum Ende des Sommers auf mehr als die Hälfte seiner Fläche zusammen.

Das alles hat massive Auswirkungen auf die Artenvielfalt und die hochspezialisierten Ökosysteme, die sich an die harschen Lebensbedingungen der Arktis angepasst haben. Und auch das Leben der Menschen verändert sich radikal. In der russischen Teilrepublik Nord-Jakutien etwa taut an vielen Stellen der bislang gefrorene Permafrost-Boden auf, so dass ganze Dörfer im Schlamm versinken.

Tatsächlich zeigen Messungen, dass sich weite Teile des arktischen Permafrost-Bodens in Kanada und Sibirien bereits seit Jahrzehnten erwärmen. Taut dieser Boden großflächig auf, könnten große Mengen an Treibhausgasen zusätzlich in die Atmosphäre gelangen und die globale Erwärmung noch verstärken. Tauender Dauerfrostboden hat somit nicht nur Auswirkungen auf die Ökosysteme und Menschen vor Ort, sondern beeinflusst das weltweite Klima und damit das Leben von uns allen.

Dieser Beitrag stellt auf Basis aktueller wissenschaftlicher Forschungsergebnisse den Einfluss des Klimawandels auf den arktischen Permafrost vor und nimmt dabei besonders die Region Ost-Sibirien/Nord-Jakutien in den Fokus. Darüber hinaus beschreibt das Kapitel mögliche Entwicklungsszenarien für die Zukunft.

Die Rolle des Permafrostes

Die Wissenschaft spricht von Permafrost oder Dauerfrostboden, sobald die Temperatur des Bodens in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null °C liegt (Murton 2021). Der Untergrund kann dabei aus Gestein, Sedimenten oder Erde bestehen und einen Eisanteil von bis zu 80 % des Gesamtvolumens enthalten. Im nordöstlichen Sibirien etwa gibt es Regionen, in denen 70 % des Untergrundes aus Eis bestehen (Maribus 2019). Die mächtigen Permafrostschichten Sibiriens sind dabei sehr alt und ein Erbe der letzten Eiszeit. Vor etwa 100 000 bis 10 000 Jahren gab es hier dauerhaft besonders kalte und langanhaltende Winter. Gleichzeitig war der Boden nicht wie etwa auf Grönland von einem kilometerdicken Eisschild geschützt, so dass die Kälte tief in den Untergrund eindringen konnte.

Grundsätzlich wird bei Permafrost zwischen terrestrischem, submarinem und Gebirgspermafrost unterschieden. Gebirgspermafrost findet sich im Hochgebirge, submariner Permafrost ist gefrorener Meeresboden in polaren Ozeangebieten, terrestrischer Permafrost kommt vor allem in den Tundren und Waldgebieten Nordamerikas und Eurasiens vor.

In Permafrostgebieten herrscht generell ein extrem kalt-trockenes Klima vor. Die obersten Schichten des Bodens sind dabei nährstoffarm und zeitweise stark durchnässt, wenn sie jahreszeitenbedingt auftauen. Gedeihen können hier vor allem flachwurzelnde Bäume und Sträucher. Es wird dabei zwischen Regionen mit kontinuierlichem Permafrost unterschieden (vor allen Dingen in der Arktis), bei denen der Untergrund in einer Größenordnung von 90 bis 100 % gefroren ist, und Regionen mit nicht kontinuierlichem Permafrost, bei dem dieser Anteil nur zwischen 50 bis 90 % der Fläche liegt (siehe Abb. 1) (Maribus 2019).

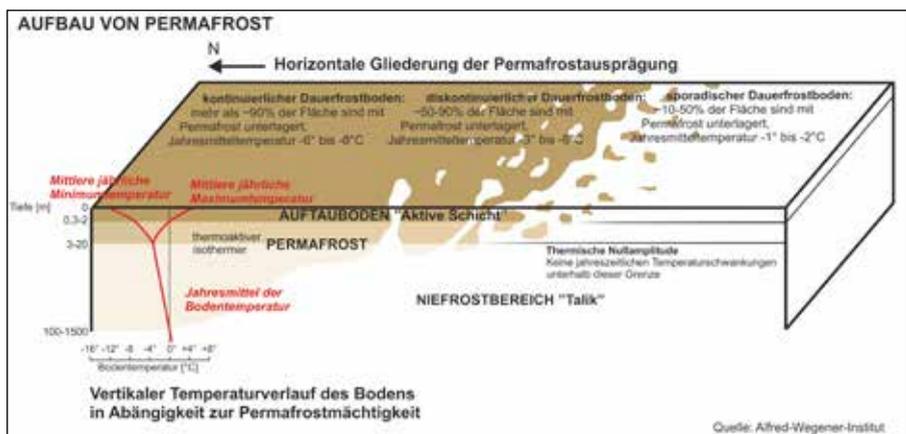


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines Permafrostbodens.

Permafrostgebiete nehmen auf der Nordhalbkugel etwa 24 % der Landfläche ein. Die Gesamtfläche beträgt global zwischen 16 und 21 Millionen Quadratkilometern (Murton 2021). Davon werden allein 32 000 Quadratkilometer vom Lena-Delta in Sibirien bedeckt (Hubberten et al. 2006). In einigen Teilen Nordostsibiriens erreicht der Permafrost infolge geringer Winterniederschläge und einer fehlenden schützenden Schneedecke eine extreme Mächtigkeit von bis zu 1,5 km und eine Ausdehnung bis in mittlere Breiten (Nelson 2003). An der Grenze zum diskontinuierlichen Permafrost liegt die Mächtigkeit lediglich bei rund 60 Metern, zum sporadischen Permafrost noch bei etwa 12 Metern. Einige Permafrostböden sind schon seit über 100 000 Jahren gefroren. Neuere Untersuchungen konnten für einige Permafrostschichten in Ostsibirien sogar ein maximales Alter von 650.000 Jahren bestimmen (Murton 2021). Eine Übersicht über die Verteilung der Permafrostarten auf der Nordhalbkugel gibt Abb.2.

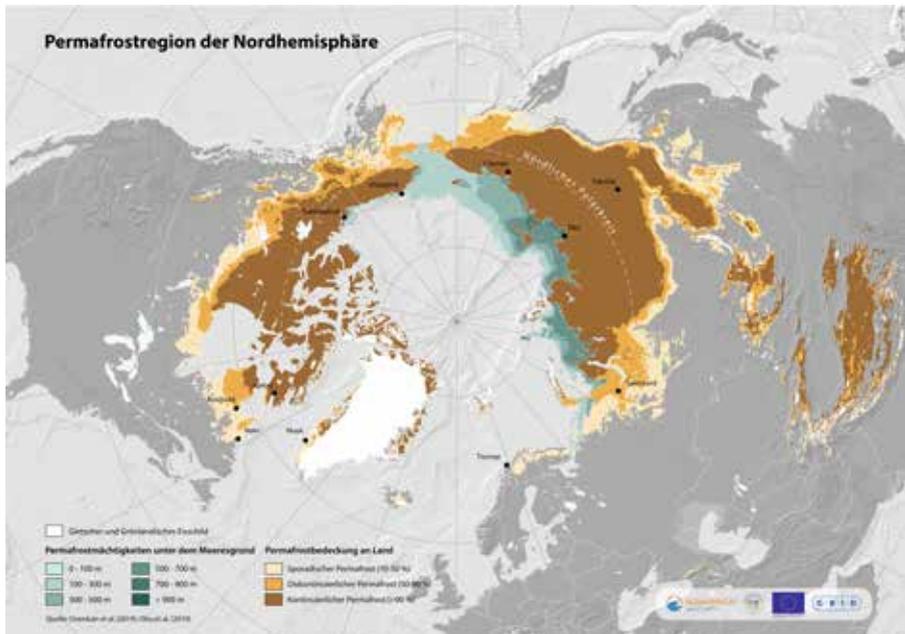


Abb. 2: Verteilung der verschiedenen Arten von Permafrost auf der Nordhemisphäre nach Bedeckungsgrad (sporadisch, diskontinuierlich oder kontinuierlich) im terrestrischen Bereich sowie die Tiefe des Permafrosts im marinen Bereich (Quelle: Nunataryuk Projekt; <https://www.flickr.com/photos/gridarendal/albums/72157713104471568>).



Abb. 3a

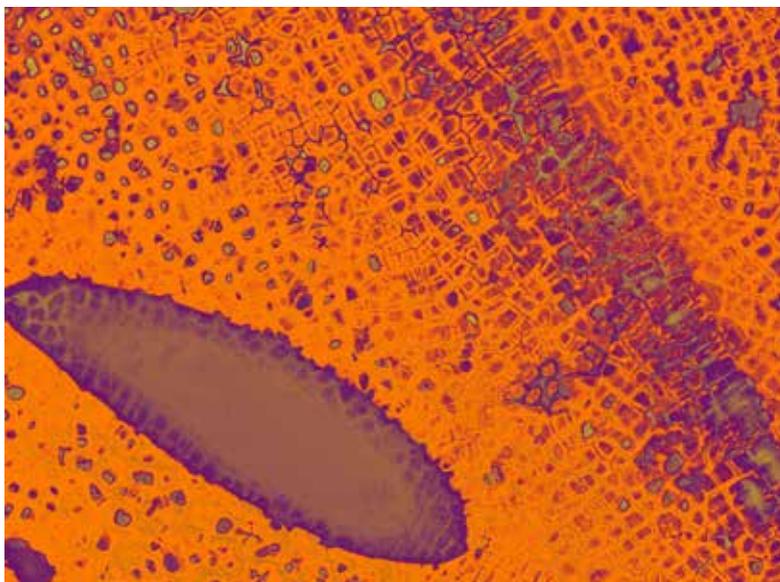


Abb. 3b

Abb. 3: (a) Netzartige Strukturen aus Eiskeilpolygonen prägen die Permafrostlandschaft. Foto: Konstanze Piel/AWI.

(b) Luftbild der polygonalen Tundra auf der Insel Samoylov (Lena-Delta, Sibirien), bei dem die Farben künstlich verfälscht wurden, um einige Landschaftsstrukturen deutlicher sichtbar zu machen, wie z.B. verschieden tiefe Wasserflächen. Foto: Julia Boike/AWI.

Die meisten Permafrost-Landschaften sind an ihrer typischen Oberflächenmusterung aus regelmäßigen Vielecken – sogenannten polygonalen Netzstrukturen – zu erkennen (Abb. 3). Wegen der extrem kalten Wintertemperaturen zieht sich der gefrorene Boden an der Oberfläche zusammen, wodurch zentimeterbreite und metertiefe Risse entstehen. Während der Schneeschmelze im Frühjahr füllen sich diese Risse mit Wasser, das wegen der Bodenkälte sofort wieder gefriert. So bilden sich nach und nach vertikale Eisvenen, die durch wiederholtes Schmelzen und Gefrieren über Jahrzehnte und Jahrtausende zu Eiskeilen heranwachsen und an der Oberfläche die typischen Polygonmuster entstehen lassen (siehe Abb. 4).

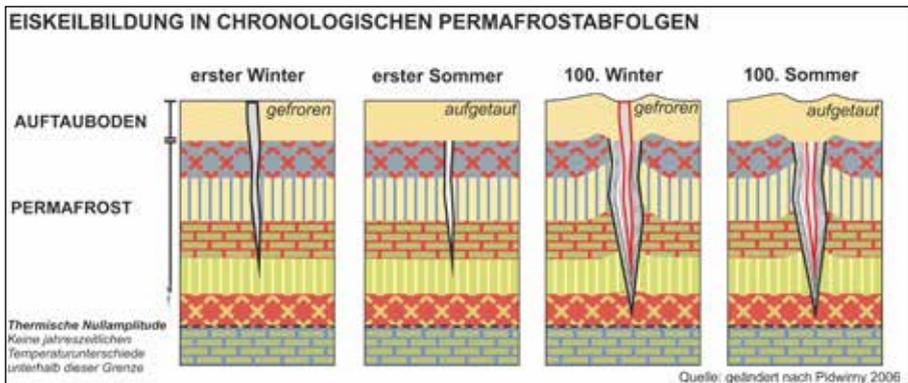


Abb. 4: Schematische Darstellung zur Bildung von Eiskeilen in chronologischen Permafrostabfolgen (Quelle: geändert nach Pidwirny 2006).

Ein typischer Permafrostboden besteht aus zwei Schichten: Einer sogenannten aktiven oder Auftauschicht und einer gefrorenen Schicht. Die aktive obere Schicht taut jeden Sommer in eine Tiefe von 15 bis maximal 100 Zentimeter auf. Der Großteil der biologischen und biochemischen Aktivität in den arktischen Böden findet in dieser dünnen Schicht statt. Forscher können durch regelmäßige Messung der Temperatur beider Schichten die Auftautiefe – also die Schichtgrenze zum Dauerfrostboden – bestimmen.¹ Diese wichtigen Messdaten geben Aufschluss darüber, welche Auswirkungen die globale Klimaerwärmung auf den Permafrost hat: Kurzfristige Klimaschwankungen beeinflussen vor allem die Auftautiefe, langfristige Veränderungen des Klimas verändern auch die Temperaturen des darunterliegenden Dauerfrostbodens.

Im Permafrost sind riesige Mengen abgestorbener Pflanzenreste gespeichert. Im Gegensatz zu tropischen oder gemäßigten Klimazonen kann dieses organische Material im gefrorenen Boden nicht durch Mikroben abgebaut oder umgewandelt werden, da sie erst aktiv werden, wenn der Permafrost taut. Erwärmt sich das Klima

¹ Global Terrestrial Network for Permafrost. www.gtnp.org

jedoch weiter, beginnen die Bakterien mit der Zersetzung des organischen Materials. Dadurch gelangt der in den Pflanzenresten gespeicherte Kohlenstoff als Treibhausgas (entweder Methan, CH₄ oder Kohlenstoffdioxid, CO₂) in die Atmosphäre und beschleunigt den Klimawandel weiter.

Veränderungen der Permafrost-Temperatur

In der jüngeren Vergangenheit wurden an vielen Langzeitmessstellen der nördlichen Hemisphäre in der gefrorenen Permafrostschicht Rekordtemperaturen gemessen. An manchen Orten liegt die Temperatur in 10 bis 20 Metern Tiefe dabei 2 bis 3 °C höher als vor 30 Jahren (Desyatkin et al. 2015). Im Durchschnitt stieg die Temperatur in den Gebieten mit kontinuierlicher Permafrostbedeckung zwischen den Jahren 2007 und 2016 um $0,39\text{ °C} \pm 0,15\text{ °C}$ an. In den wärmeren diskontinuierlichen Zonen mit geringerer Bedeckung fiel der Anstieg im gleichen Zeitraum mit $0,20\text{ °C} \pm 0,10\text{ °C}$ deutlich geringer aus. Grund dafür ist der sogenannte latente Wärmeeffekt. In den diskontinuierlichen Zonen liegen die Temperaturen häufiger in der Nähe des Nullpunktes, so dass dort im Zuge der Erwärmung auch größere Mengen Eis schmelzen. Bei diesem Phasenwechsel von fest zu flüssig wird Wärme absorbiert, die dann nicht mehr zum Temperaturanstieg beiträgt. Durch die Eisschmelze dehnt sich aber die aktive Schicht in größere Tiefen aus, so dass auch der mikrobielle Abbau von Pflanzenresten und damit die Freisetzung von Treibhausgasen zunehmen kann (Meredith et al. 2019).

Veränderungen des Grundeises

Durch das Auftauen von Permafrost und den Verlust von im Untergrund gebildetem Eis – sogenanntem Grundeis – sinkt die Landoberfläche ein. Dies kann die darüber liegenden Ökosysteme empfindlich stören und damit die Infrastruktur der Menschen – Straßen, Bahntrassen, Pipelines und Häuser – beschädigen. Wie stark Klimawandel und Schmelze die Landoberfläche verändern, hängt dabei vor allem vom Eisanteil ab. Dieser ist in Permafrostböden regional-typisch und variiert von 40 % des Gesamtvolumens in einigen Sanden bis zu 80–90 % des Gesamtvolumens in feinkörnigen Böden und Sedimenten.

Mit den stärksten Veränderungen durch den Klimawandel muss in den besonders eisreichen, „Yedoma“ genannten Permafrostböden in Sibirien, Alaska und im kanadischen Yukon-Territorium gerechnet werden. Dieser Permafrost-Typus hat einen Eisanteil von 50 bis 90 Prozent und verfügt über massive Eiskeile und viel Poreneis im Boden (siehe Abb. 5). Andere, besonders gefährdete Gebiete enthalten große Gletschereiskörper von beträchtlicher Dicke und Ausdehnung. Diese finden sich beispielsweise im Nordwesten Kanadas, auf den Inseln des kanadischen Archipels, auf den Halbinseln Jamal und Gydan in Westsibirien sowie in kleineren Bereichen Ostsibiriens und Alaskas.

Das Gesamtvolumen des in den nördlichen Permafrostregionen enthaltenen Bodeneises wird mit „mittlerem Vertrauen“ auf 5630 bis 36 550 Kubikkilometer geschätzt (Meredith et al. 2019). Schmilzt diese Eis komplett ab, würde das zusätzliche Wasser den globalen Meeresspiegel um 2 bis 10 Zentimeter ansteigen lassen. Das „mittlere Vertrauen“ und die große Schwankungsbreite der Zahlen machen deutlich, dass die wissenschaftlichen Daten bislang nur für eine grobe Schätzung ausreichen.

Die Unsicherheit wissenschaftlicher Aussagen wird nach IPCC-Standard (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, auch bekannt als „Weltklimarat“) in fünf Stufen angegeben: Sehr geringes Vertrauen – *very low confidence* (Aussage ist in weniger als 1 von 10 Fällen richtig), Geringes Vertrauen – *low confidence* (in 2 von 10 Fällen richtig), mittleres Vertrauen – *medium confidence* (in 5 von 10 Fällen richtig), hohes Vertrauen – *high confidence* (in 8 von 10 Fällen richtig), sehr hohes Vertrauen – *very high confidence* (in mindestens 9 von 10 Fällen richtig) (Solomon et al. 2007).



Abb.5: Seitlicher Blick auf das eisreiche Sobo-Sise-Yedoma-Kliff mit abgebrochenen Blöcken, das sich ca. 1,5 km am Strand der Lena entlangzieht. An seiner höchsten Stelle fällt das Kliff mit Permafrostboden 27 Meter steil ab – so hoch wie ein mehrstöckiges Haus. Person als Maßstab. Foto: Thomas Opel/AWI.

Kohlenstoffspeicher Permafrost

In den Permafrostregionen lagern große Mengen organischen Kohlenstoffs, die sehr empfindlich auf Klimaveränderungen reagieren. Zwei der wichtigsten Fragen in der Klimaforschung sind deshalb: Wieviel Kohlenstoff kann aus dem gefrorenen Boden-

reservoir entweichen, wenn dieses als Folge der höheren Temperaturen auftaut? Und wieviel davon gelangt als CO₂ und Methan in die Atmosphäre und beschleunigt dort den Klimawandel? (Abb. 6)

Die derzeit beste mittlere Schätzung des gesamten (Oberfläche plus Tiefe) organischen Bodenkohlenstoffs (terrestrisch) in der nördlichen Permafrostregion ($17,8 \times 10^6$ km² Fläche) beträgt 1460 bis 1600 Gigatonnen („mittleres Vertrauen“) (Schuur 2013; Schuur 2019). Einige zusätzliche Kohlenstoffreservoirs sind in dieser Zahl noch nicht berücksichtigt, weil sie nur mit „geringem Vertrauen“ quantifiziert werden können und deshalb noch zu unsicher sind.



Abb. 6: Luftaufnahmen der russischen Tundra im Lena-Delta mit der russischen Forschungsstation Samoylov im Hintergrund. Die Aufnahmen entstanden während eines Methan-Messfluges mit dem HELIPOD und einem Helikopter. Gut zu erkennen sind die Eiskeilpolygone, die der Landschaft ihr typisches Muster verleihen. Foto: Torsten Sachs/GFZ.

Ein solcher, noch relativ unbekannter „Kohlenstoffpool“ ist der submarine Permafrostboden in den flachen Schelfmeergebieten des Arktischen Ozeans – auch bekannt als Nordpolarmeer. Was heute Meeresboden ist, lag auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20 000 Jahren trocken. In dieser Zeit haben sich durch die auf ihm wachsende Vegetation sowie durch Wind und Wetter Bodenschichten mit Pflanzenresten und darin gespeichertem organischen Kohlenstoff abgelagert. Dieser submarine Permafrost taut aufgrund von eindringendem Meerwasser nun langsam auf. Dabei ist noch weitgehend unklar, wieviel organischer Kohlenstoff dabei in Treibhausgase umgewandelt wird und wieviel in den Sedimenten zurückbleibt (Meredith et al. 2019).

Wenn Permafrost im Sommer in der aktiven Schicht auftaut, beginnen Mikroben mit der Zersetzung des organischen Materials. Dabei wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) und – wenn Sauerstoff fehlt – Methan (CH_4) gebildet. Bisher wurde vermutet, dass im Permafrost unter Sauerstoffabschluss nur geringe Mengen an Methan entstehen können. Neuere Studien gehen jedoch davon aus, dass genauso viel Methan wie CO_2 produziert werden könnte. Dies ist besonders Besorgnis erregend, weil Methan eine 25-Mal stärkere Treibhausgaswirkung als Kohlendioxid (CO_2) besitzt (Knoblauch et al. 2018).

Die menschengemachte Erwärmung könnte sich durch einen positiven Rückkopplungseffekt aus der Freisetzung von Methan aus dem auftauenden arktischen Permafrost noch beschleunigen. Berechnungen gehen dabei in Zukunftsszenarien, die nur geringen oder keinen Klimaschutz vorsehen, von einem zusätzlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von bis zu $0,27^\circ\text{C}$ bis 2100 und bis zu $0,42^\circ\text{C}$ bis 2300 aus (McGuire et al. 2018).

Methan kann dabei nicht nur aus dem mikrobiellen Abbau organischer Stoffe in den auftauenden Permafrostböden (mikrobielles Methan) entstehen, sondern auch aus Erdgas (thermogenes Methan), das unter oder in der Permafrostschicht eingeschlossen ist und beim Auftauen freigesetzt wird (Froitzheim et al. 2021).

Im Jahr 2020 erlebte Sibirien eine extreme Hitzewelle. Die Halbinsel Taymyr in Nordsibirien war dabei das Gebiet mit der weltweit größten positiven Oberflächentemperaturanomale für 2020 – hier war es bis zu 6°C wärmer als im Langzeitmittel von 1979–2000.² Als Folge der Hitzewelle sind auch die atmosphärischen Methankonzentrationen in Nordsibirien seit Juni 2020 deutlich angestiegen, wie die PULSE-Karte der Methankonzentrationen³ zeigt. Der Anstieg war im Juli/ August 2020 und im März/ April 2021 am stärksten. Im Sommer 2020 gab es zwei auffällige langgestreckte Bereiche mit erhöhter Methankonzentration, ungefähr parallel zueinander, mehrere hundert Kilometer lang und Südwest nach Nordost verlaufend. Anfang 2021 stieg die Methankonzentration im gesamten Gebiet an (Froitzheim et al. 2021).

In beiden langgestreckten Streifen lagern im Untergrund Kalksteinsedimente. Über diesen sogenannten Karbonaten sind die Böden dünn oder nicht vorhanden und Feuchtgebiete sind selten. Die hohen Methankonzentrationen werden daher wahrscheinlich nicht durch mikrobielles Methan aus Böden oder Feuchtgebieten verursacht. Stattdessen wird vermutet, dass Gashydrate (feste Einschlüsse aus Gas und Wasser) in Brüchen und Taschen der Karbonatgesteine in der Permafrostzone aufgrund der Erwärmung der Oberfläche instabil wurden. Dieser Prozess könnte der Atmosphäre in naher Zukunft unbekannte Mengen weiteren Methans hinzufügen (Froitzheim et al. 2021).

2 <https://climatereanalyzer.org> (Zugriff am 8.11.2021).

3 <https://pulse.ghgsat.com/> (Zugriff am 8.11.2021).

Treiber der Permafrostzerstörung

Die kontinuierliche Erwärmung des Klimas lässt die Temperaturen in Permafrostregionen steigen und gefrorene Böden allmählich tauen. Der Klimawandel beeinflusst jedoch auch abrupte Störungen wie Feuer, Bodensenkungen und Erosion infolge des Auftauens von eisreichem Permafrost (Thermokarst). Diese Störungen sind zwar grundsätzlich natürliche Prozesse in arktischen und borealen Ökosystemen, allerdings verändert die globale Erwärmung ihre Häufigkeit und ihre Ausmaße (Meredith et al. 2019).

Viele dieser Störungen zerstören die isolierende organische Bodenschicht an der Oberfläche und sorgen so für einen Abbau des Permafrosts. Ein extremes Beispiel sind die jährlichen Waldbrände auf den arktischen Landflächen. In einigen gut untersuchten Regionen zeigt sich, dass die verbrannten Flächen, die Feuerhäufigkeit und die extremen Jahre mit Waldbränden heute höher sind, als in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts oder sogar in den letzten 10 000 Jahren (Meredith et al. 2019).

In der Region Jakutien etwa hat sich die jährliche Durchschnittstemperatur seit Beginn des 20. Jahrhunderts um 3 °C erwärmt – 2 °C mehr als im weltweiten Durchschnitt. Im Sommer 2021 wurden an mehreren Tagen Hitzerekorde von 39 °C verzeichnet. Es ist zwar schwierig, einzelne Brände direkt mit dem Klimawandel in Verbindung zu bringen, aber die globale Erwärmung macht Brände wahrscheinlicher, da härtere und längere Dürreperioden Regionen austrocknen und so ideale Brandbedingungen schaffen. Und da der Sommer im Jahr 2021 nach Angaben der örtlichen Behörden der trockenste in Jakutien seit 150 Jahren war, wurde die Region zu einem Pulverfass, in dem Waldbrände mehr als 1,5 Millionen Hektar des sumpfigen Taigawaldes vernichtet haben (Gershkovich 2021).

In Jakutien – einer Region mit knapp 1 Million Einwohnern – wurde der Großteil der Waldbrandbekämpfung von Tausenden erschöpfter Feuerwehrleute und lokaler Freiwilliger übernommen, die mit knappen Ressourcen arbeiten mussten. Wegen der limitierten Kräfte hatte dabei der Schutz von Siedlungen Vorrang. Dutzende Brände wurde so nicht gestoppt und konnten unkontrolliert weiterbrennen.

Nach Angaben der russischen Forstbehörde sind seit Jahresbeginn (2021) landesweit mehr als 11,5 Millionen Hektar abgebrannt – weit mehr als der Jahresdurchschnitt seit 2000 von 8,9 Millionen Hektar. Von Sibirien bis zum Ural und der Region Karelien im Nordwesten des Landes hat Russland in dieser Saison „untypische Brände“ erlebt. Die Auswirkungen sind offenbar auf den Klimawandel zurückzuführen (Gershkovich 2021).

Die Brände setzen nicht nur große Mengen an Kohlenstoff in die Atmosphäre frei, sondern zerstören auch das Ökosystem selbst, das die Emissionen wieder absorbieren könnte. Außerdem tragen sie dazu bei, dass der ohnehin schon auftauende Permafrost in Jakutien nun in noch größerem Umfang auftaut. Dies setzt noch mehr Kohlenstoff in die Atmosphäre frei und beschleunigt so den Klimawandel.

Eine weitere abrupte Störung des Permafrosts tritt auf, wenn mehrere Faktoren zusammenwirken. Durch das Schmelzen des Bodeneises etwa sinkt die Bodenoberfläche teilweise großflächig ein. Brände können den Boden zusätzlich anfälliger für Erosion machen. Führen extreme Niederschläge dann zu Ansammlungen von stehendem oder fließendem Wasser in den Senken, können Permafrostböden deutlich tiefer und schneller auftauen und schließlich erodieren als dies allein durch die Erhöhung der Lufttemperatur verursacht würde. Weil der Klimawandel sowohl die Häufigkeit von Bränden als auch von Extremwetter erhöht, werden wahrscheinlich auch abrupte Erosionsereignisse häufiger auftreten (Abb. 7).



Abb.7: Aufnahme von der Frühjahrsflut der Lena an der sibirischen Permafrostinsel Samoylov. Der Fluß transportiert in jedem Frühjahr dicke Eisschollen Richtung Arktischer Ozean. Foto: Torsten Sachs/GFZ.

Veränderungen des Ökosystems

Das Ökosystem der Polarregionen ist seit Jahrtausenden auf extreme Wetter- und Klimabedingungen angepasst. Diese liegen jedoch innerhalb eines speziellen Temperaturkorridors. Die rasante Geschwindigkeit des Klimawandels wird aller Voraussicht nach tiefgreifende Auswirkungen auf die Pflanzen der borealen Wälder auf allen hierarchischen Ebenen haben: von Waldzonen über Ökosysteme und Arten bis hin zu Populationen innerhalb von Arten. Die wichtigsten zonalen Vegetationstypen, die von Geobotanikern in den Ebenen Mittelsibiriens identifiziert wurden, sind:

- (1) Tundra;
- (2) Waldtundra;
- (3) Dunkelnadelige (Sibirische Zirbelkiefer – *Pinus sibirica*, Sibirische Fichte – *Picea obovata* und Sibirische Tanne – *Abies sibirica*) Taiga (unterteilt in nördlich, mittel, südlich) auf Hochebenen;
- (4) Hellnadelige (Sibirische Lärche – *Larix sibirica*, Dahurische Lärche – *Larix gmelinii* und Waldkiefer – *Pinus sylvestris*) Taiga (nördlich, mittel, südlich);
- (5) Birke (Hänge-Birke – *Betula pendula* und Moor-Birke – *Betula pubescens*) und lichtenadelige (Sibirische Lärche – *Larix sibirica* und Waldkiefer – *Pinus sylvestris*) Subtaiga;
- (6) Birke (Hänge-Birke – *Betula pendula* und Moor-Birke – *Betula pubescens*) und lichtenadelige (Sibirische Lärche – *Larix sibirica* und Waldkiefer – *Pinus sylvestris*) Waldsteppe; und
- (7) Steppe.

Im heutigen Klima Sibiriens herrscht auf 65 % der Fläche Taiga vor, von der wiederum 75 % aus lichtenadeliger Taiga bestehen, in der Sibirische und Dahurische Lärchen die vorherrschenden Arten sind. In den wärmeren Klimazonen des Südens oder auf sandigen Böden in der mittleren und sogar nördlichen Taiga können auch Waldkiefern diese Wälder dominieren. Dunkelnadelige Taiga (25 %) kommt in feuchtwarmen Klimazonen vor, so zum Beispiel in der westsibirischen Tiefebene westlich des Jenisseis, entlang des Jenissei-Rückens in den mittleren Breiten und im gebirgigen Süden Sibiriens. In den hohen Breiten des Putorana-Gebirges (nördlich des Polarkreises) kann nur die Lärchentaiga dem kalten Klima und dem Permafrost widerstehen (Tchebakova et al. 2010).

Das Auftauen von Permafrost und die Vergrößerung der Auftautiefe haben weitreichende Folgen für die Ökosysteme. Eine wichtige Konsequenz dieser Prozesse ist die Bildung von Thermokarst. Dabei handelt es sich um Bodenabsenkungen und -einbrüche, die vermooren und sich mit Wasser füllen (Abb. 8). So zeigen Satellitendaten, dass sich in der zusammenhängenden Permafrostzone Sibiriens die von Seen eingenommene Fläche in den letzten 30 Jahren bereits um 12 % vergrößert hat. Wo der Permafrost bis in die Tiefe ganz aufgetaut ist, versickert dagegen das Wasser und die Anzahl und Fläche der Seen nimmt ab. Hier können sich neue Pflanzengemeinschaften ansiedeln, so dass Strauchvegetation und Wälder aus dem Süden ihre Grenzen im Zuge der steigenden Temperaturen nach Norden verschieben. Die sich nach Norden ausbreitende Vegetation ist dabei in der Regel üppiger und kann deshalb auch mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen und in der eigenen Biomasse binden. Dieser, den Klimawandel bremsende Effekt wird jedoch durch das verringerte Rückstreuvermögen für Sonnenlicht (Albedo) von Strauch- und Wald-

gegenüber Tundraflächen mehr als ausgeglichen. Denn Waldflächen sind dunkler als Tundraflächen, absorbieren mehr Sonnenstrahlung und erwärmen sich deshalb stärker (Maribus 2019).



Abb. 8: Thermokarst-Seen in Alaska. Foto: Josefine Lenz/AWI.

Einen großen Einfluss hat der Klimawandel auf die sibirischen Lärchenwälder. Im Gegensatz zu Kiefern und Lärchen ist die sibirische Lärche (*Latrix gmeliniie*) ein Flachwurzler, dem eine Auftautiefe im Sommer von nur 20 bis 30 Zentimeter ausreicht, um zu wachsen. Der flache, dichte Wurzelteppich bildet dabei eine wirkungsvolle Schutzschicht für den darunterliegenden Permafrostboden. Der Permafrostboden taut in Regionen, in denen Lärchenwald abgeholzt wurde, deutlich schneller als in bewaldeten Gebieten (Maribus 2019). Wo Schnee schmilzt und der Permafrostboden taut, staut sich Schmelzwasser, weil es aufgrund des gefrorenen Untergrunds nicht versickern kann. Die Auftauschicht enthält deshalb viel Wasser und ist sehr beweglich. Hierdurch kann es zu großräumigen Bodenrutschungen kommen und damit zu Erosion führen (Maribus 2019).

Insgesamt wird die globale Erwärmung auf dem ganzen Planeten zu einer großflächigen Verschiebung der Vegetationszonen zu den Polen hin führen (Abb.9). Modellprognosen gehen davon aus, dass die sibirische Taiga bis 2090 auf die Hälfte ihrer heutigen Fläche schrumpfen könnte, während sich die Steppen- und Halbwüstenvegetation ausbreiten und ihre Fläche von heute etwa 20 % auf dann 60 % verdrei-

fachen könnten. Ein wärmeres Klima wird Baumarten wie Waldkiefer und Sibirische Lärche begünstigen, Arten wie die Dahurische Lärche werden dagegen zunehmend unter Druck geraten. Das künftige Klima könnte dabei auch für gemäßigte Laubbaumarten geeignet sein, die heute in Sibirien gar nicht vorkommen. Feuer und das Tauen des Permafrostes werden diese Verschiebung der Vegetation weiter begünstigen. Das Ausmaß der prognostizierten Auswirkungen ist so tiefgreifend, dass die Aufrechterhaltung eines scheinbaren Gleichgewichts zwischen der Verbreitung von Pflanzen und dem Klima die Unterstützung des Menschen bei der Migration von Pflanzen erfordern wird (Tchebakova et al. 2010).

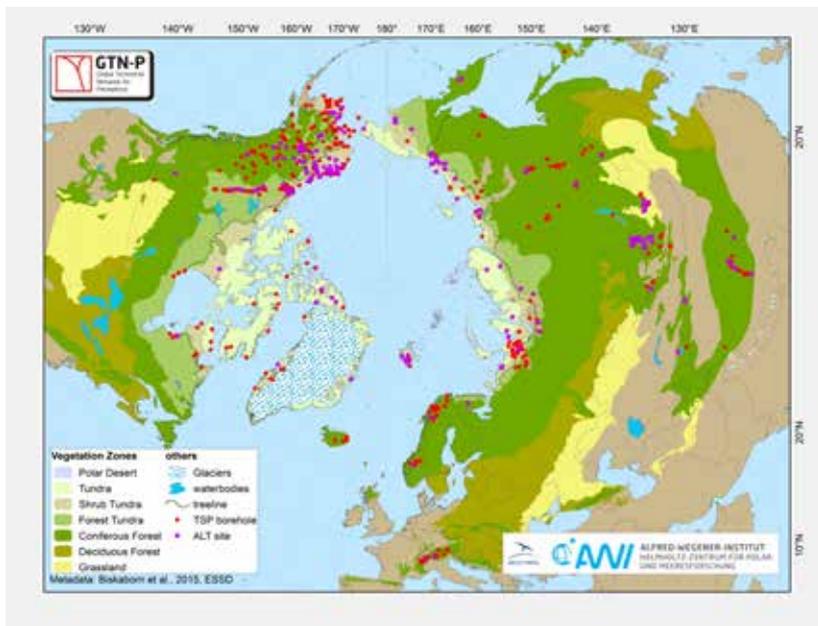


Abb.9: Diese Karte zeigt die in der GTN-P-Datenbank enthaltenen Bohrlöcher für Temperaturmessungen (thermal state of permafrost, TSP) und Messstellen der Auftauschicht (active layer thickness, ALT) im Vergleich zu zirkumpolaren Vegetationszonen in der Arktis (Quelle: Global Terrestrial Network for Permafrost, GTN-P, <https://gtnp.arcticportal.org/resources/maps/12-resources/39-other-maps>).

Küstenerosion

Permafrostküsten in der Arktis machen mehr als 30 % der Küstenlinien der Erde aus und bilden die Grenze zwischen dem Arktischen Ozean und dem vom Permafrost beeinflussten Land (Jones et al. 2020). Der Klimawandel bewirkt zahlreiche Veränderungen, die zu einer verstärkten Küstenerosion beitragen. Dazu zählen die Abnahme

der Meereisausdehnung, steigende Luft- und Meeresoberflächentemperaturen, absoluter und relativer Meeresspiegelanstieg, aufwärmender Permafrost, absinkende Permafrostlandschaften und zunehmende Stürme und Wellenhöhen. Die Küstenerosion hat dabei erhebliche Folgen für Menschen und Ökosysteme: Sie verändert die Küstenlinie, zerstört Vegetationsflächen und die Infrastruktur der lokalen Bevölkerung. Als besonders anfällig für Erosion gelten dabei Bereiche aus verfestigten Sedimentablagerungen (unter anderem Sande und Tone), die etwa 65 % der arktischen Permafrostküsten ausmachen. Die verbleibenden 35 % bestehen aus felsigem Material, das eine höhere Stabilität aufweist (Jones et al. 2020).

Besonders betroffen von der Küstenerosion ist Ostsibirien. Mit jedem Grad Temperaturerhöhung beschleunigt sich hier der Landverlust um ca. 1,2 Meter pro Jahr, der an das Meer verloren geht (Abb. 10). Während früher eine dicke Meereisschicht den gefrorenen Boden fast das ganze Jahr über schützte, zieht sie sich in diesem Teil der Arktis in den Sommermonaten immer weiter zurück. Die Zahl der Sommertage, an denen das Meereis in der südlichen Laptevsee vollständig verschwindet, nimmt stetig zu. In der Folge können Wellen die Küsten und Klippen unterspülen und abtragen (Jones et al. 2020).

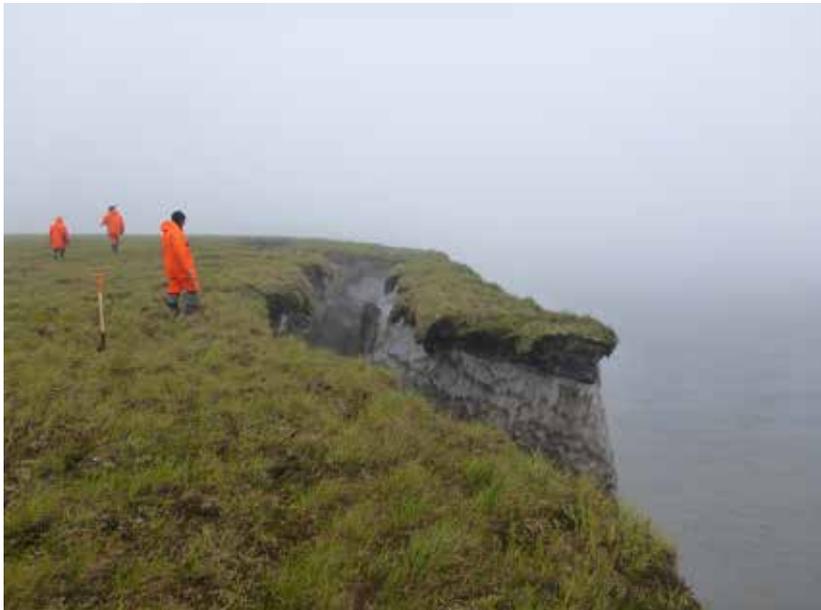


Abb. 10: Blick von der oberen Kante des Sobo-Sise-Kliffs am Lena-Fluss mit abbrechendem Permafrostblock. Foto: Guido Grosse/AWI.

Ganze Inseln drohen dadurch zu verschwinden, wie etwa die kleine Insel Muostakh östlich des Lena-Deltas. An ihrer Nordspitze weist sie eine schwankende Erosionsrate von 10 bis 20 Metern pro Jahr auf und hat so in nur 60 Jahren (1950 bis 2010) bereits ein Viertel ihrer Fläche verloren. Zudem bricht auch die Oberfläche der Insel ein, weil der Untergrund, der hier zu 80 % aus Eis besteht, auftaut. In nur hundert Jahren könnte Muostakh so in mehrere Teile zerbrochen oder vollständig verschwunden sein.

Einfluss der Veränderungen auf die Infrastruktur

Tauen von Bodeneis hat in Regionen mit eisreichem Permafrost drastische Konsequenzen für arktische Landschaften und besiedelte Gebiete, da das Schmelzen des unregelmäßig im Boden verteilten Eises auch zu einem ungleichmäßigen Absinken der Landoberfläche führt und so Gebäude, Straßen, Schienen und Pipelines beschädigt (Abb. 11).



Abb. 11: Das Tauen des Permafrostbodens hat weitreichende Folgen auch für die Städte und Infrastrukturen, selbst in der Stadt Jakutsk, der Hauptstadt der Teilrepublik Sacha. Foto: Renate Treffeisen/AWI.

Etwa die Hälfte der arktischen und subarktischen Bevölkerung weltweit lebt in Russland, dessen Territorium zu rund 66 % aus Permafrostgebieten besteht. Tauen die Böden weiter, drohen der Russischen Föderation erhebliche wirtschaftliche und soziale Schadenrisiken für Städte, Gemeinden und Überland-Infrastrukturen wie Straßen, Schienenwege und Pipelines (Maribus, 2019). Auf den russischen Staat könn-

ten hier Reparatur- und Instandhaltungskosten von bis zu 85 Milliarden US-Dollar anfallen, sollte die Klimaerwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts ungebremst fortschreiten („worst-case-Szenario“).

Aufgrund der starken Eigenwärme und der vertikalen Verformungskräfte im Permafrostboden können Rohrleitungssysteme zum Transport von Wärme, Wasser, Erdöl und Erdgas auch bei langen Strecken in der Regel nur oberirdisch gebaut werden. Allein in Russland gibt es ein ausgedehntes Netz von Öl- und Gaspipelines mit einer Länge von mehr als 71 000 km, weitere sind in Planung. Verformungen von Rohren durch auf- und absteigende Frostprozesse, Abschmelzen von unterirdischem Eis, Staunässe oder Thermokarst können katastrophale Auswirkungen haben, etwa wenn Öllecks große Landflächen und sensible Ökosysteme dauerhaft belasten (Opal und Ulrich 2015).

Zukünftige Entwicklung des Permafrosts

In den letzten Jahrzehnten hat sich als Folge des Klimawandels nicht nur die Atmosphäre erwärmt. Auch die Temperatur der oberen Schichten des Permafrosts ist in einigen Gebieten um etwa zwei Grad Celsius gestiegen. Dadurch hat sich die Grenze zwischen kontinuierlichem und diskontinuierlichem Permafrost weiter nach Norden in Richtung Pol verschoben. Dass der Permafrost vielerorts tatsächlich taut und zerfällt, belegen unter anderem Messungen in Bohrlöchern, die in der globalen Permafrost-Datenbank GTN-P veröffentlicht werden (gtnp.org).

Trotz vieler Unsicherheiten prognostizieren die Klimamodelle, dass der oberflächennahe Permafrost unter zukünftigen globalen Erwärmungsszenarien erheblich abnehmen wird. Dadurch besteht die Gefahr, dass noch mehr Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) in die Atmosphäre freigesetzt werden und dort den Klimawandel noch beschleunigen. Ein aktuelles Problem ist, dass die meisten Klimamodelle diese Permafrost-Kohlenstoffdynamik nicht integrieren. Denn wie lang der Permafrost tatsächlich noch stabil bleibt, hängt nicht nur von der Bodentemperatur, sondern auch von der Energiebilanz an der Oberfläche, der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Bodens, der Vegetation, der Schneebedeckung und der Anwesenheit von Seen und Flüssen sowie dem Grundwasser in der Umgebung ab. Alle diese Faktoren müssen bei weiteren und genaueren Prognosen berücksichtigt werden.

Der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) kommt in seinem 1,5 Grad Sonderbericht zu dem Schluss, dass bei einer globalen Erwärmung von 1,5 °C die Fläche der Permafrostregionen im Vergleich zu heute um 21 bis 37 % schrumpfen würde. Bei einer Erwärmung von bis zu 3 °C ist davon auszugehen, dass sie in einem noch größeren Umfang auftauen würden (Maribus 2019).

Weitere Veröffentlichungen des IPCC von 2021 (Masson-Delmotte et al. 2021) stellten zudem fest, dass die Erwärmung unter einem zukünftigen Entwicklungsszenario mit hohen Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2100 zu einem Verlust an

Permafrostkohlenstoff in Höhe von 10 bis 100 Gigatonnen führen würde. Bei niedrigeren Emissionsszenarien schätzt der IPCC die Freisetzung von CO_2 aus den Permafrostböden bis 2100 auf 20 bis 58 Gigatonnen Kohlenstoff bei einem optimistischen Szenario und auf 28 bis 92 Gigatonnen Kohlenstoff bei einem moderaten Szenario.

Das Auftauen des terrestrischen Permafrosts in einer wärmeren Welt wird demnach nahezu sicher zur Freisetzung von Kohlenstoff führen. Allerdings ist das Vertrauen in den Zeitpunkt, das Ausmaß und die Linearität der Permafrost-Klima-Rückkopplung aufgrund der großen Bandbreite veröffentlichter Schätzungen und der unvollständigen Kenntnis und Darstellung der Triebkräfte und Beziehungen in den Modellen gering. Es ist nach den Simulationen wahrscheinlich, dass die CO_2 -Freisetzung aus dem Permafrost bis zum Jahr 2100 18 (3,1-41) Gigatonnen Kohlenstoff pro 1°C betragen wird, wobei der relative Beitrag von CO_2 und CH_4 noch nicht genau bekannt ist. Es wird davon ausgegangen, dass eine weitere Erwärmung das Auftauen der Permafrostböden und den Verlust der saisonalen Schneedecke, des Landeises und des arktischen Meereises weiter verstärken wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es auf der Grundlage einer hohen Übereinstimmung zwischen Klimasimulation (CMIP6) des neuesten Weltklimaberichtes (IPCC 2021) und älteren Modellprojektionen, grundlegendem Prozessverständnis und paläoklimatischen Beweisen praktisch sicher ist, dass Ausdehnung und Volumen des Permafrosts mit der globalen Klimaerwärmung schrumpfen werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Permafrostfläche bis zum Jahr 2080 um 25 % verringern könnte, wenn sich der Ausstoß von Treibhausgasen nicht verringert (Masson-Delmotte et al. 2021: 2158). Dies wird große Veränderungen des gesamten Ökosystems zur Folge haben mit einschneidenden Auswirkungen für die Umweltbedingungen von Menschen und Tier.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Recherche und Unterstützung in der Verfassung des finalen Textes bei Leonhard Günther (Praktikant) sowie Nils Ehrenberg (Wissenschaftsjournalist) bedanken.

Literatur

- Climate Reanalyzer*. Climate Change Institute, University of Maine, USA. <https://climate-reanalyzer.org/about/>
- Desyatkin, R., Fedorov, A., Desyatkin, A., and P. Konstantinov 2015. Air Temperature Changes and Their Impact on Permafrost Ecosystems in Eastern Siberia. *Thermal Science* 19 (Suppl. 2): 351–360. <https://doi.org/10.2298/TSC150320102D>
- Froitzheim, N., Majka, J., and D. Zastrozhnov 2021. Methane Release from Carbonate Rock Formations in the Siberian Permafrost Area During and After the 2020 Heat Wave. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Aug 2021, 118 (32) e2107632118; DOI: 10.1073/pnas.2107632118
- Gershkovich, E. 2021. Siberia Feels the Brunt of Climate Change as Wildfires Rage. *The Moscow Times*, Article updated on Sep. 7, 2021. <https://www.themoscowtimes.com/2021/08/05/siberia-feels-the-brunt-of-climate-change-as-wildfires-rage-a74704> (Zugriff am 8.11.2021).
- Hubberten, H. W., Wagner, D., Pfeiffer, E. M., Boike, J., Gukov, A. Y. 2006. The Russian-German Research Station Samoylov, Lena Delta – A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic. *Polarforschung* 73 (2–3): 111–116. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung und Deutsche Gesellschaft für Polarforschung, Bremerhaven, Germany.
- Jones, B. M., Irrgang, A. M., Farquharson, A. M., Lantuit, H., Whalen, D., Ogorodov, S., Grigoriev, M., Tweedie, C., Gibbs, A. E., Strzelecki, M. C., Baranskaya, A., Belova, N., Sinitsyn, A., Kroon, A., Maslakov, A., Vieira, G., Grosse, G., Overduin, P., Nitze, I., Maio, C., Overbeck, J., Bendixen, M., Zagorski, P., and V. Romanovsky 2020. *Coastal Permafrost Erosion*. National Oceanic and Atmospheric Administration. United States Department of Commerce. <https://doi.org/10.25923/e47w-dw52>
- Knoblauch, C., Beer, C., Liebner, S., Grigoriev, M. N., and Pfeiffer, E. M. 2018. Methane Production as Key to the Greenhouse Gas Budget of Thawing Permafrost. *Natural Climate Change* 8: 309–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0095-z>
- McGuire, A. D., Lawrence, D. M., Koven, C., Clein, J. S., Burke, E., Chen, G., Jafarov, E., MacDougall, A. H., Marchenko, S., Nicolsky, D., Peng, S., Rinke, A., Ciais, P., Gouttevin, I., Hayes, D. J., Ji, D., Krinner, G., Moore, J. C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schaefer, K., Schuur, E. A. G., and Q. Zhuang 2018. Dependence of the Evolution of Carbon Dynamics in the Northern Permafrost Region on the Trajectory of Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Apr 2018, 115 (15): 3882–3887. <https://doi.org/10.1073/pnas.171990311>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. 2021. Summary for Policymakers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovern-

- mental Panel on Climate Change. (in press). https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.
- Maribus gGmbH (ed.) 2019. Arktis und Antarktis – extrem, klimarelevant, gefährdet. *World Ocean Review* (6).
- Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H., and Schuur, E. A. G. 2019. *Polar Regions*. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. International Panel on Climate Change. Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., and N.M. Weyer (eds.), 202–319. (in press).
- Murton, J. B. 2021. Chapter 14 – Permafrost and Climate Change. In *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* (Third Edition). Trevor M. Letcher (ed.), 281–326. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00014-1> (Zugriff am 8.11.2021).
- Nelson, F. E. 2003. (Un)frozen in Time. *Nature* 299:1673. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1081111>
- Pidwirny, M. 2006. “Periglacial Processes and Landforms”. *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10ag.html> (accessed: 8.11.2021)
- Opel, T., and A. Ulrich 2015. Permafrostdegradation in Sibirien – Sozio-ökonomische Aspekte. In *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz und H. Escher-Vetter (Hrsg.), 262–270. www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. <https://doi.org/10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.40> (Zugriff am 8.11.2021).
- Puls-GHGSat. *Methan-Konzentration*. <https://pulse.ghgsat.com/> (accessed: 8.11.2021)
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. 2007. IPCC, 2007: *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, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Schuur, E. A. G., Abbott, B. W., Bowden, W. B., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J. P., Chanton J. P., Chapin III, F. S., Christensen, T. R., Ciais P., Crosby B. T., Czimczik C. I., Grosse, G., Harden J., Hayes D. J., Hugelius, G., Jastrow, J. D., Jones, J. B., Kleinen, T., Koven, C. D., Krinner G., Kuhry P., Lawrence, D. M., McGuire A. D., Natali S. M., O’Donnell, J. A., Ping C. L., Riley W. J., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Sannel, A. B. K., Schädel C., Schaefer K., Sky J., Subin, Z. M., Tarnocai, C., Turetsky M. R., Waldrop M. P., Walter Anthony, K. M., Wickland K. P., Wilson C. J., and S. A. Zimov, 2013. Expert Assessment of Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change. *Climatic Change* 119: 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
- Schuur, T. 2019. Permafrost and the Global Carbon Cycle. In *Arctic Report Card*. J.

Richter-Menge, M. L., Druckenmiller, and M. Jeffries (eds.). <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/844/Permafrost-and-the-Global-Carbon-Cycle> (Zugriff am 8.11.2021).

Tchebakova, N. M., Rehfeldt, G. E., & Parfenova, E. I. 2010. From Vegetation Zones to Climates: Effects of Climate Warming on Siberian Ecosystems. In *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests*. Osawa, A., Zyryanova, O. A., Matsuura, Y., Kajimoto, T., Wein, R. W. (eds.). *Ecological Studies* (209): 427–446. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/36298> (Zugriff am 8.11.2021).

