



DAS AKTUELLE WISSEN
ZUM THEMA:

Permafrost

Seit Jahrzehnten erwärmen sich in den hohen Breiten große Areale mit gefrorenem Boden- dem so genannten Permafrost. Taut dieser Permafrost, der auch als Dauerfrost bezeichnet wird, könnten große Mengen Treibhausgas in die Atmosphäre gelangen und die globale Erwärmung verstärken. Tauender Dauerfrostboden hat somit nicht nur lokale Auswirkungen, sondern betrifft das Klima und so auch Menschen weltweit.

Was ist Permafrost?

Von Permafrost oder Dauerfrostboden sprechen Forscher, sobald die Temperatur des Bodens in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter null Grad Celsius liegt. Der Untergrund kann dabei aus Gestein, Sedimenten oder Erde bestehen und unterschiedlich große Eismengen enthalten. In der Arktis gibt es Gebiete, in denen 70 Prozent des Untergrundes aus Eis bestehen - beispielsweise im nordöstlichen Sibirien. Dort gab es während der Eiszeit vor 100.000 bis 10.000 Jahren besonders kalte und lange Winter. Gleichzeitig wurde der Boden dort nicht von einem Eisschild geschützt, so dass kalte Luft tief in den Boden eindringen konnte. Bis circa 1,6 Kilometer reicht der Dauerfrost in dieser Region heute ins Erdinnere. Die meisten Permafrost-Landschaften sind an der typischen Musterung ihrer Oberfläche zu erkennen, zum Beispiel durch so genannte polygonale Netzstrukturen, die sich durch wiederholtes Gefrieren im Winter bilden. Die extrem kalten Winter-

temperaturen der Arktis führen dazu, dass sich der gefrorene Boden über die Landschaftsoberfläche hinweg zusammenzieht. Hierdurch entsteht ein regelmäßiges Muster von Rissen, ganz ähnlich wie Bodenrisse nach einer Dürre. Während der Schneeschmelze im Frühjahr werden diese zentimeterweiten und metertiefen Risse mit Wasser gefüllt. Aufgrund der Kälte des Bodens gefriert dieses Wasser gleich wieder, wodurch sich vertikale Eisvenen bilden, die über Jahrzehnte und Jahrtausende zu Eiskeilen heranwachsen und an der Oberfläche die typischen Polygonmuster entstehen lassen.



Eine zehn Meter hohe Steilwand ragt über dem Wissenschaftler auf Herschel Island in der kanadischen Arktis empor. An Abbruchkanten wie diesen liegen die Schichten des Permafrosts blank. (Foto: M. Fritz, Alfred-Wegener-Institut)

Wie ist ein Permafrostboden aufgebaut?

Ein typischer Boden in einer Permafrostregion besteht aus zwei Schichten: einer so genannten aktiven und einer gefrorenen Schicht. Die aktive obere Schicht taut jeden Sommer um circa 15 bis 100 Zentimeter auf. In dieser dünnen Schicht spielt sich der Großteil der biologischen und biochemischen Aktivität in arktischen Böden ab. Wissenschaftler messen regelmäßig die Temperatur dieser aktiven Schicht sowie der darunterliegenden gefrorenen Bodenschicht, um die Grenze - die Auftautiefe - zwischen den beiden Schichten zu bestimmen. Ihre Messergebnisse veröffentlichen sie in einer globalen Datenbank, dem Global Terrestrial Network for Permafrost (www.gtnp.org). Während die Auftautiefe Aufschluss über kurzfristige Klimaschwankungen gibt, zeigen die Permafrost-Temperaturen der unteren Schichten längerfristige Klimaveränderungen. So lässt sich die Auswirkung der globalen Klimaerwärmung auf die Polargebiete und Bergregionen messen.

Wo gibt es Permafrostböden?

Permafrost tritt viel häufiger auf, als allgemein vermutet wird - circa ein Viertel der Landfläche auf der Nordhalbkugel sind Permafrostböden. Der Großteil dieser Böden findet sich in den Polarregionen, aber auch in hohen Gebirgen. So gibt es sogar in Deutschland alpinen Permafrost, nämlich auf der Zugspitze. Dabei unterscheiden Wissenschaftler - je nach Flächenausdehnung - zwischen kontinuierlichem Permafrost in kalten Gebieten, in denen mindestens 90 Prozent einer Region Permafrostböden sind und diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost in wärmeren Gebieten, in denen zwischen zehn und 90 Prozent des Bodens dauerhaft gefroren sind.

Wie taut Permafrost?

Die Tauprozesse sind oft nicht linear. In Ny-Ålesund zum Beispiel beobachten AWI-Wissenschaftler seit Beginn ihrer Permafrost-Messungen im Jahr 1998 einen starken Tauprozess, der die Auftauschicht um 50 Zentimeter ausgedehnt hat. In der Tiefe aber haben sich die Permafrost-Temperaturen kaum verändert. Im Gegensatz dazu ist die Auftauschicht im Lena-Delta (Sibirien) nicht tiefer gewandert. Dafür erwärmt sich dort der tiefere Permafrost stark - und zwar mit mehr als 1,5 Grad Celsius seit dem Jahr 2006 (gemessen in zehn Metern Tiefe).

Was passiert, wenn Permafrost taut?

Wie in einer gigantischen Tiefkühltruhe sind im Permafrost riesige Mengen abgestorbener Pflanzenreste gespeichert. Im Gegensatz zu tropischen oder gemäßigten Klimazonen kann diese organische Materie im gefrorenen Boden nicht durch Mikroben abgebaut werden, da Bakterien erst aktiv werden, wenn der Permafrost taut.

Doch wenn sich das Klima weiter erwärmt - die Tür zur Tiefkühltruhe sozusagen aufgestoßen wird -, beginnt das Zersetzen des organischen Materials. Dadurch gelangt der Kohlenstoff, der in den Pflanzenresten gespeichert war, als Treibhausgas in die Atmosphäre. Das führt zur weiteren Erwärmung des Klimas. Diese Rückkopplung würde sich folglich auf das gesamte globale Klimasystem auswirken.

Darüberhinaus kann das Tauen von Bodeneis in Regionen mit eisreichem Permafrost drastische Konsequenzen für arktische Landschaften und besiedelte Gebiete haben, weil das Schmelzen des unregelmäßig verteilten Eises zu ungleichmäßigem Absinken der Landoberfläche führt. Die Folge: Straßen, Eisenbahnschienen, Landebahnen, Gebäude und Öl- und Gas-Pipelines können beschädigt werden.



Auf dem Inselplateau Herschel Islands erforschen die Wissenschaftler, wie schnell der Permafrost auftaut, welche Nährstoffe sich in den Böden befinden und wie sich die Vegetation mit der steigenden Temperatur verändert. (Foto: B. Radosavljevic, Alfred-Wegener-Institut)

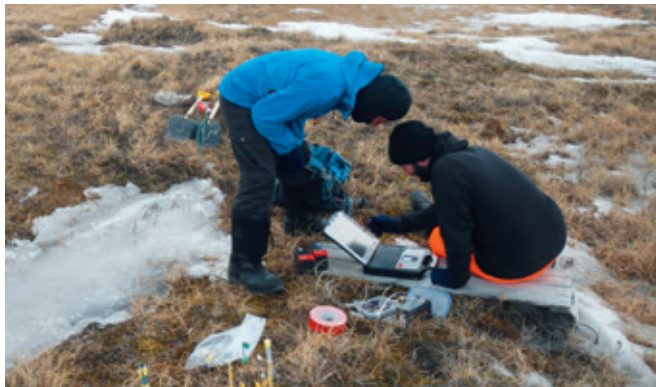
Die physische und biochemische Entwicklung des Permafrosts zu prognostizieren gilt allerdings als eine äußerst komplexe Aufgabe. Viele Oberflächeneigenschaften ändern sich gleichzeitig, wie zum Beispiel die Schneedecke und die Vegetation. Dadurch kommt es zu vielfältigen und oft gegenläufigen Effekten. Außerdem greift der Mensch zunehmend in die Landschaftsentwicklung ein. Vorhersagen sind darum immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Studien zu vergangenen Klimaveränderungen wie zu jener Wärmeperiode, die unmittelbar nach der letzten Eiszeit folgte und in welcher die Arktis sich sehr schnell erwärmte, haben jedoch gezeigt, dass Permafrost dramatisch von steigenden Temperaturen beeinflusst wird. Schlussendlich könnte der Dauerfrostboden unter Umständen gar nicht so dauerhaft sein.

In welchem Ausmaß wird tauender Permafrost zum Klimawandel beitragen?

Wenn Permafrost taut, beginnen Bakterien und Mikroorganismen Tier- und Pflanzenreste zu zersetzen. Dabei wird Kohlendioxid oder Methan freigesetzt - abhängig

davon wie trocken (Kohlenstoff) oder feucht (Methan) der Boden ist. Nur gut zwei Prozent der freigesetzten Treibhausgase sind Methan. Allerdings ist Methan ein sehr wirkungsvolles Treibhausgas, dessen globales Erwärmungspotential über eine Zeitspanne von 100 Jahren fast 25-mal so hoch ist wie jenes des Kohlendioxides.

Bisher wird angenommen, dass Permafrost-Gebiete Kohlenstoffsinken sind. Allerdings gibt es hierzu nur wenige Messreihen, die ganzjährig in Permafrost-Gebieten den Austausch von Kohlendioxid bilanziert haben. Eine dieser Messreihen stammt vom AWI Bayelva-Messfeld, nahe Ny-Ålesund, auf Spitzbergen, die zweite befindet sich in Alaska. In Alaska konnte das untersuchte Gebiet als Senke ausgewiesen werden. Die Messungen am Standort Spitzbergen haben jedoch eine Jahresbilanz um null ergeben. Das heißt, hier besteht ein Gleichgewicht zwischen der Aufnahme von Kohlenstoff durch die Vegetation im Sommer und der langen Winter-Ausgasung, bei welcher Mikroorganismen unter der Schneedecke Kohlenstoff zersetzen.



AWI-Wissenschaftler untersuchen den Permafrostboden im Lena-Delta.
(Foto: T. Opel, Alfred-Wegener-Institut)

Wissenschaftler haben mit Hilfe von Modellen berechnet, dass der Treibhausgasausstoß des Permafrosts unter anhaltender Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg von bis zu 0,29 Grad Celsius führen könnte, bis zum Jahr 2300 bis zu mehr als 0,40 Grad Celsius.

Wie viel Kohlenstoff enthält der Permafrost?

Wissenschaftler nehmen an, dass der gefrorene Boden zwischen 1300 und 1600 Gigatonnen Kohlenstoff enthält. Zum Vergleich: Die gesamte Atmosphäre enthält derzeit rund 800 Gigatonnen Kohlenstoff. Der Kohlenstoff im Permafrost stammt von Tier- und Pflanzenresten, die seit Jahrtausenden in der Erde lagern. Ein Großteil dieses Kohlenstoffs befindet sich in den oberen Bodenschichten. Hinzu kommen jedoch noch unbekannte Mengen Kohlenstoff im submarinen Permafrost. Darunter versteht man Permafrost, der sich in der letz-

ten Eiszeit an Land gebildet hat und mit dem Ende der Eiszeit durch den steigenden Meeresspiegel überflutet wurde und nun unter dem Meeresboden liegt.

Wie empfindlich ist der Permafrost?

In den letzten Jahrzehnten hat sich nicht nur die Atmosphäre erwärmt. Auch die Temperatur der oberen Schichten des Permafrosts ist in einigen Gebieten um etwa zwei Grad Celsius gestiegen. Die Grenze des kontinuierlichen Permafrosts verläuft so weiter nördlich. Dass der Permafrost vielerorts taut und zerfällt, belegen unter anderen Messungen in Bohrlöchern, die in der globalen Permafrost-Datenbank GTN-P veröffentlicht werden.

Wie lang der Permafrost noch stabil bleibt, hängt außerdem von der Bodentemperatur ab. Weitere Einflussfaktoren sind die Energiebilanz an der Oberfläche, die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Bodens, die Vegetation, die Schneebedeckung und die Anwesenheit von Seen und Flüssen sowie das Grundwasser in der Umgebung.

Sibirien beheimatet heute den Permafrost mit der größten Ausdehnung, Dicke und durchschnittlichen Kälte - mit einer Jahresmitteltemperatur von rund minus zehn Grad Celsius. Der kälteste Boden befindet sich allerdings im nördlichsten Kanada. Dort liegt die Jahresmitteltemperatur bei minus 15 Grad Celsius. Vergleichsweise warm ist der Permafrost auf Spitzbergen mit einer Durchschnittstemperatur von minus zwei Grad Celsius. Die Mitteltemperaturen werden in einer Tiefe bestimmt, in der die jahreszeitlichen Schwankungen nicht mehr spürbar sind.



Ein Aufschluss von begrabenem Gletschereis auf Herschel Island
(Foto: B. Radosavljevic, Alfred-Wegener-Institut)

Warum zerfallen Permafrostküsten zunehmend?

Die Küstenerosion in der Arktis hat sich über die vergangenen Jahrzehnte verstärkt. Das liegt an der geringeren Meereisbedeckung des Arktischen Ozeans im Sommer, an höheren Wassertemperaturen und am

steigenden Meeresspiegel. Weniger Meereis bedeutet zum Beispiel, dass bei Wind größere Wellen entstehen, die auf die arktischen Küsten treffen. Im Durchschnitt zieht sich die arktische Küstenlinie um circa einen halben Meter pro Jahr zurück. Einzelne Küstenabschnitte jedoch, die aus sehr eisreichem Permafrost bestehen, ziehen sich um bis zu 25 Meter pro Jahr zurück. Diese schnellen Veränderungen haben große Auswirkungen auf das küstennahe arktische Ökosystem und die dort lebende Bevölkerung.

Wird die Tundra bei steigender Temperatur grüner?

Steigt die Temperatur in der Arktis, wird auch das Pflanzenwachstum angeregt und somit die Fixierung des Kohlenstoffs in organischer Materie. Das kann dem Treibhausgasausstoß des Permafrostbodens zunächst entgegenwirken. Über längere Zeiträume jedoch und bei weiter ansteigenden Temperaturen übersteigt der Ausstoß von Treibhausgasen durch die Zersetzungsprozesse der Mikroorganismen die Fähigkeit der Pflanzen, Kohlendioxid aufzunehmen.

Zieht sich der Permafrost gen Norden zurück?

Vor allem im europäischen Teil der russischen Arktis zieht sich der Permafrost stark zurück. Im Zeitraum von 1995 bis 2005 hat sich die südliche Grenze der Regionen mit kontinuierlichem Permafrost um bis zu 50 Kilometer nach Norden zurückgezogen. In Gebieten mit diskontinuierlichem Permafrost betrug der Rückzug Richtung Norden bis zu 80 Kilometer.

Kontakt zu den AWI-Experten



CarboPerm, PAGE 21 und submariner Permafrost:
Prof. Dr. Hans-Wolfgang Hubberten,
Tel: 0331 288-2100,
E-Mail: Hans-Wolfgang.Hubberten@awi.de



GTN-P:
Dr. Boris Biskaborn,
Tel: 0331 288-2102,
E-Mail: Boris.Biskaborn@awi.de



Permafrost-Küstenerosion:
Prof. Dr. Hugues Lantuit,
Tel: 0331 288-2216,
E-Mail: Hugues.Lantuit@awi.de



Thermokarst und schlagartig tauender Permafrost:
Dr. Guido Grosse,
Tel: 0331 288-2150,
E-Mail: Guido.Grosse@awi.de



Permafrost Wasser- und Energiebilanz:
PD Dr. Julia Boike,
Tel: 0331 288-2119,
E-Mail: Julia.Boike@awi.de

Wo besteht Forschungsbedarf?

- Das abrupte Auftauen untersuchen: Regional kann der Permafrost sehr schnell auftauen, wenn er viel Eis enthält und dieses zu schmelzen beginnt. Die Folge ist, dass das darüber liegende Gelände absinkt und sich in der entstehenden Senke Wasser ansammelt. Unter diesen so genannten Thermokarstseen taut der Boden dann sehr schnell weiter auf.
- Die Landschaftsveränderungen verstehen: Wie viele Treibhausgase die Permafrostregionen langfristig freisetzen werden und welche, hängt vor allem von der Bodenbeschaffenheit ab. Somit ist entscheidend, ob diese Regionen in Folge der Erwärmung nasser (mehr Methan) oder trockener (mehr Kohlendioxid) werden.
- Die Permafrost-Prozesse müssen in Klimamodelle aufgenommen werden, um zukünftige Klimaveränderungen besser zu verstehen und vorhersagen zu können.
- Das Netzwerk der Permafrost-Observatorien ausbauen: Wissenschaftler des Alfred-Wegener-Instituts arbeiten derzeit an einer Zusammenführung der bestehenden Permafrost-Observatorien in einem einzigen Netzwerk. So sollen die Daten besser miteinander verglichen werden können.
- Die Fernerkundung der Permafrostgebiete ausweiten, um eine große flächenmäßige Erforschung zu ermöglichen. Dies kann nur mit Hilfe von Satellitendaten erfolgen.