



FOTO: MARTIN HEIMANN/MPI FÜR BIOGEOCHEMIE

Vom schmelzenden Eis modelliert: Wenn der Permafrostboden auftaut, können sich - wie hier am sibirischen Fluss Kolyma - Thermokarstseen bilden. Die Erderwärmung verstärkt diesen Prozess.

TAUWETTER IM PERMAFROST

TEXT: KLAUS JACOB

Die dauerhaft gefrorenen Böden vor allem am nördlichen Polarkreis speichern mehr als eine Billion Tonnen Kohlenstoff. Doch mit dem Klimawandel tauen sie mehr und mehr auf. Ob dadurch große Mengen Treibhausgase freigesetzt werden, ist eine der wichtigen ungelösten Fragen der Klimaforschung. Auch Mathias Göckede, Leiter einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, geht ihr nach und ist bereits auf teils überraschende Antworten gestoßen.

Die Landschaft sieht nicht gerade so aus, als könne sie die Erderwärmung weiter befeuern: keine tiefen Täler, aus denen Schaufelradbagger Kohle fressen, keine Fördertürme der Ölindustrie und auch kein Wald, der Trockenheit oder Brandrodung zum Opfer zu fallen droht. Stattdessen eine eher karge Vegetation, nur ab und an kleine Baumgruppen, und immer wieder kleine und große Seen, teils verbunden durch natürliche Kanäle – viele Permafrostgebiete präsentieren sich mit ganz eigenem Charme. Doch die Gewässer, so idyllisch sie anmuten, zeugen von einer tiefgreifenden Veränderung. Denn viele von ihnen sind erst entstanden, seit der Klimawandel zuvor dauerhaft gefrorenen Boden tauen lässt. Damit könnte sich auch der Kohlenstoffspeicher auflösen, den der Permafrostboden bildet. Große Mengen des Elements, die

durch ganzjährigen Frost bislang gebunden waren, könnten bei steigenden Temperaturen in Form der Treibhausgase Methan und Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen und den Klimawandel zusätzlich anheizen – so eine Vermutung der Klimaforschung. Ob diese Befürchtung berechtigt ist, untersucht Mathias Göckede, Leiter einer Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena.

Etwa ein Viertel der nördlichen Landmasse gilt als Permafrostgebiet. Dazu gehören fast ganz Grönland, große Teile Sibiriens, Nordkanadas und Alaskas. Ihren Gehalt an organischem Kohlenstoff beziffern Experten auf rund 1500 Milliarden Tonnen. Das genügt theoretisch, um die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu verdreifachen. Das Potenzial des hohen Nordens, die Erderwärmung zu verstärken, ist also enorm. Das bestätigt auch der Weltklimarat in seinem jüngsten Gutachten. Der tauende Permafrost spiele mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Rolle für das Klima der nächsten Jahrhunderte, heißt es. Mehr noch: Überschreitet die Erwärmung einen kritischen Wert, könnte diese Region verstärkt auftauen, und es gäbe wegen

des sich selbst verstärkenden Mechanismus kein Zurück mehr – das System könnte einen Kipppunkt überschreiten.

Doch wie schnell dieser Prozess abläuft und welche Mengen an Treibhausgasen dabei emittiert werden, ist bisher nicht geklärt. Es fehlt schlicht an Daten. Während Wetterdaten seit mehr als hundert Jahren aufgezeichnet werden, beschäftigt sich die Forschung noch nicht lange mit den Dauerfrostböden. Die Messreihen sind bisher nicht lang genug, um angesichts der natürlichen Wetterschwankungen einen verlässlichen Trend zeigen zu können. Im Winter schneit es mal viel, mal wenig, der Sommer ist mal extrem trocken, mal extrem warm, dann wieder sehr kalt. Und Corona hat die Forschung zusätzlich erschwert: Fast zwei Jahre waren alle Forschungsreisen gestrichen, sodass manche Datenreihe nun Lücken aufweist. Göckede und sein Team hatten jedoch Glück: Russische Kollegen lasen die Daten aus ihren Geräten aus. Obendrein konnten sie bereits im September wieder reisen: „Viele meiner internationalen Kollegen waren neidisch, weil für die meisten der Zugang zu ihren Messstandorten noch nicht möglich war“, sagt Göckede.

77



Dass sich etwas ändert im hohen Norden, ist auch ohne Messungen erkennbar. Fundamente von Gebäuden sacken ab, weil der tauende Boden nicht mehr trägt. In Tscherski, Göckedes Forschungsstützpunkt, ist 2019 nach einem warmen, trockenen Sommer ein Haus eingestürzt. Danach fehlte von dem lang gestreckten Gebäude der Mittelteil. Und im Mai 2020 zerbrach in der Industriestadt Norilsk gar das Tanklager eines Heizkraftwerks. Mehr als 20 000 Tonnen Diesel liefen aus und verursachten eine Umweltkatastrophe. Auch Böschungen rutschen ab, tiefe Krater und Seen entstehen. Dazu kommen vermehrt Brände, angefacht durch immer häufigere Gewitter, deren Blitze den Zündfunken liefern. „Bis vor wenigen Jahren noch gab es um Tscherski extrem selten Brände“, sagt Göckede. In den letzten zwei Jahren wüteten nahe den Untersuchungsflächen seines Teams einige Flächenbrände – dies sogar in Überschwemmungsgebieten, die eigentlich feucht sein sollten. Dass mit dem Klimawandel Kadaver von Tieren der Eiszeit wie Mammuts oder Höhlenbären aus dem ewigen Eis zum Vorschein kommen und untersucht werden können, ist da ein schwacher Trost.

78

Ob und, wenn ja, welche Mengen an zusätzlichen Treibhausgasen durch die Erwärmung der Permafrostgebiete freigesetzt werden, untersucht Göckede mit detaillierten Messungen. Dass dabei Methan und Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangen können, liegt auf der Hand. Dazu zunächst ein Blick in die Wälder des warmen Südens: In gemäßigten Breiten oder in den Tropen nehmen Bäume Kohlendioxid aus der Luft auf und bauen es in Blätter, Äste und Stämme ein. Fallen die Blätter oder stürzt ein Baum um, zersetzen Mikroben die organische Substanz, sodass der Kohlenstoff wieder frei wird. Insgesamt sollte die Bilanz bei ausgewachsenen Wäldern und stabilem Klima also ausgeglichen sein. Im Permafrost gelten andere Regeln. Hier taut während des Sommers die obere Schicht des Bodens auf und gefriert im Winter erneut. Diese sogenannte Aktivschicht, die nicht zum Permafrost gehört, ist zwischen 40 Zentime-

ter und mehrere Meter dick. Darauf gedeiht zwar eine oft nur schütterere Vegetation, deren Rückstände werden aber kaum abgebaut. Die Ursache liegt nicht nur in den niedrigen Temperaturen, sondern auch in der Staunässe, die in arktischen Ökosystemen weit verbreitet ist. Über Jahrtausende konnte sich so Kohlenstoff – tiefgefroren – im Boden anreichern, manchmal bis zu einer Tiefe von mehreren Hundert Metern.

Steigen die durchschnittlichen Temperaturen nun an, wie seit einigen Jahrzehnten in der Arktis beobachtet, kann der Boden bis in größere Tiefen auftauen. Die darunterliegenden Permafrostschichten werden destabilisiert, und Mikroben bauen den darin enthaltenen Kohlenstoff ab. Dabei produzieren sie Treibhausgase wie CO_2 und CH_4 . In trockenen Systemen mit viel Sauerstoff im Boden erzeugt

die Mikrobengemeinschaft vornehmlich Kohlendioxid. Ist das Ökosystem dagegen wassergetränkt, produzieren anaerobe Mikroorganismen Methan, das einen besonders starken Treibhauseffekt ausübt. Welche Mengen an Methan in die Atmosphäre gelangen, wird maßgeblich beeinflussen, wie sehr der auftauende Permafrost den Klimawandel verstärkt.

Schon die Anreise ist schwierig

Den Gasaustausch zwischen Luft und Boden exakt zu messen, ist allerdings eine Herausforderung. Zunächst müssen Göckede und sein Team ihr Untersuchungsgebiet erreichen, was schon schwierig genug ist: Sie fliegen nach Moskau, dann weitere sechs Stunden nach Jakutsk, der größten



Klimakatastrophe:
Wegen des auftauenden Bodens sackte 2020 in der sibirischen Stadt Norilsk das Tanklager eines Heizkraftwerks ab und zerbrach. Mehr als 20 000 Tonnen Diesel traten aus und verschmutzten die Umwelt.

Stadt im sibirischen Permafrostgebiet, und von dort mit einer kleineren Maschine noch mal vier Stunden bis in den 2500-Einwohner-Ort Tscherski, rund 100 Kilometer vor der Mündung der Kolyma ins Polarmeer. Vom dortigen russischen Forschungsstützpunkt „Northeast Science Station“ starten sie zu ihren Versuchsfeldern. Auf einem ungestörten Areal der Tundra im Überflutungsgebiet der Kolyma haben sie zwei Türme aufgestellt, auf denen ihre Instrumente laufen. 20-mal pro Sekunde messen die Apparate die Konzentrationen von Methan, Kohlendioxid und Wasserdampf. Auch die Luftbewegungen werden aufgezeichnet. Die hohe Frequenz ist nötig, um die turbulenten Austauschprozesse in der bodennahen Atmosphäre zu erfassen. Nur so lässt sich ermitteln, welche Mengen an Kohlenstoff vom Boden und von der Vegetation aufgenommen oder

abgegeben werden. Ein weiteres Problem bei den Forschungen ist die Inhomogenität der Permafrostgebiete. Kein Areal gleicht dem anderen – hier ein junger See, dort ein schütteres Krüppelwäldchen, hier ein Überschwemmungsgebiet, dort eine Abbruchkante. Eigentlich müsste man viele Versuchsreihen starten, um diese kleinräumige Zergliederung in den Griff zu bekommen. Allerdings gibt es eine Bodenform, die häufig vorkommt. Sie zeichnet sich durch zahlreiche Eiskeile aus, die den Boden wie ein Netzwerk durchziehen. Bei einer Erwärmung tauen diese Keile verstärkt auf, und der Boden kann an den betreffenden Stellen absacken. So entsteht aus einer vormals weitgehend homogenen, ebenen Tundrafläche eine Landschaft aus Gräben, in denen sich Wasser sammelt, und relativ trockenen Inseln dazwischen. Diese Eiskeil-Degradation ist ein Prozess, der in den kom-

menden Jahrzehnten im hohen Norden häufig zu erwarten ist. Um zu verstehen, wie sich dabei die Kohlenstoff-Flüsse verändern, haben die Max-Planck-Forschenden den Effekt künstlich erzeugt und ein Gebiet von rund 200 Metern Durchmesser mit einem Drainagegraben trockengelegt.

Derzeit fast kein zusätzlicher Treibhauseffekt

Diese Versuchsfläche existiert nun seit etwa siebzehn Jahren. Nach einem ersten Experiment über vier Jahre und einer darauffolgenden mehrjährigen Unterbrechung misst und beobachtet Göckedes Team dort seit acht Jahren kontinuierlich, wie sich die Landschaft auf der künstlichen Insel



verändert. Der Wandel ist deutlich sichtbar: Die Vegetation gedeiht, wächst in größere Höhe. Es gibt nicht mehr nur Gras, sondern auch Büsche.

Interessant sind natürlich vor allem die Emissionen von Treibhausgasen. „Die Ergebnisse haben uns überrascht“, sagt Göckede. Da anaerobe Mikroben auf der weitgehend trockenen künstlichen Insel keinen geeigneten Lebensraum mehr fanden, gingen die Emissionen von Methan zurück – gegenüber einer ungestörten Referenzfläche halbierten sie sich etwa, wie die Messungen zeigten. Beim Kohlendioxid sieht es hingegen anders aus: Da der Bewuchs zunahm, sollte das Ökosystem eigentlich mehr Kohlenstoff aufnehmen. Doch insgesamt betrachtet, war das Gegenteil der Fall: Die Vegetation sog zwar tatsächlich mehr Kohlendioxid aus der Luft, doch insgesamt gab das Ökosystem CO_2 ab. Der Grund dafür waren steigende Emissionen aus dem tauenden Permafrostboden – die zusätzliche Aufnahmekapazität der Vegetation konnte diese nicht wettmachen.

80

Wenn man die gesamte Wirkung beider Treibhausgase auf den Treibhausef-

fekt bilanziert und dabei berücksichtigt, dass Methan ein wirkungsvolleres Treibhausgas als Kohlendioxid ist, ergibt sich derzeit fast kein zusätzlicher Treibhauseffekt. Weniger Methan, mehr Kohlendioxid – „der Nettoeffekt ist erstaunlich ausgeglichen“, erklärt Göckede. Damit hatte niemand gerechnet. Zunächst könnte die Treibhausgasbilanz der gestörten Permafrostgebiete trotz der deutlich veränderten Eigenschaften des Ökosystems also ähnlich ausfallen wie jene ungestörter Flächen in der unmittelbaren Umgebung. Allerdings ist noch unklar, ob sich diese Resultate auf andere arktische Regionen übertragen lassen. Diese Frage können nur Experimente an weiteren Standorten klären.

Künftig vermutlich mehr Treibhausgase

Und was die langfristige Entwicklung betrifft, ist Mathias Göckede eher pessimistisch. Der Effekt der sprießenden Vegetation sei nicht von Dauer, selbst wenn er einige Jahre oder Jahrzehnte anhalte. Denn irgendwann lasse sich der Pflanzenwuchs nicht weiter steigern. Büsche

und Bäume können nicht in den Himmel wachsen. Voraussichtlich werden also der Beitrag der tauenden Böden und damit die Emission von Kohlendioxid und Methan steigen.

Eine andere Entdeckung von Göckedes Team ist der starke Einfluss einer Schneedecke auf den Permafrostboden. Als in einem Winter dreimal so viel Schnee fiel wie in einem durchschnittlichen Jahr, war die obere Bodenschicht teilweise mehr als zehn Grad wärmer als sonst, obwohl die Lufttemperatur im Vergleich zu den Vorjahren kaum verändert war. Da Schnee den Boden isoliert, können schneereiche Winter das Auftauen des Permafrosts erheblich beschleunigen.

Um den Permafrost zu erhalten und seine Treibhausgasbilanz zu verbessern, verfolgen russische Forschende einen originellen Ansatz: Sie setzen auf die Arbeit von Wiederkäuern. Vor rund 25 Jahren haben sie den „Pleistozän-Park“ geschaffen und seitdem mit erheblichem Aufwand ganze Herden von Tieren herbeigeschafft: Pferde, Moschusochsen, Bisons, Ziegen, Schafe, inzwischen sogar Kamel. Die Idee dahinter: Die Tiere düngen mit ihren Ausscheidungen

Im auftauenden Permafrost bilden sich zwischen den neu entstehenden Gewässern relativ trockene Inseln (rechts). Dort sinkt der Wasserspiegel (schraffierte blaue Fläche), verglichen mit dem ursprünglichen nassen Ökosystem (links), im Sommer ab. So können dort höhere Pflanzen wachsen. Durch den Klimawandel sammelt sich Schnee zudem früher im Herbst, er taut im Frühsommer auch etwas schneller wieder ab. Das trockene Ökosystem gibt im Vergleich zum nassen CO_2 ab, setzt aber weniger Methan frei, sodass seine Treibhausgasbilanz etwa gleich ausfällt.

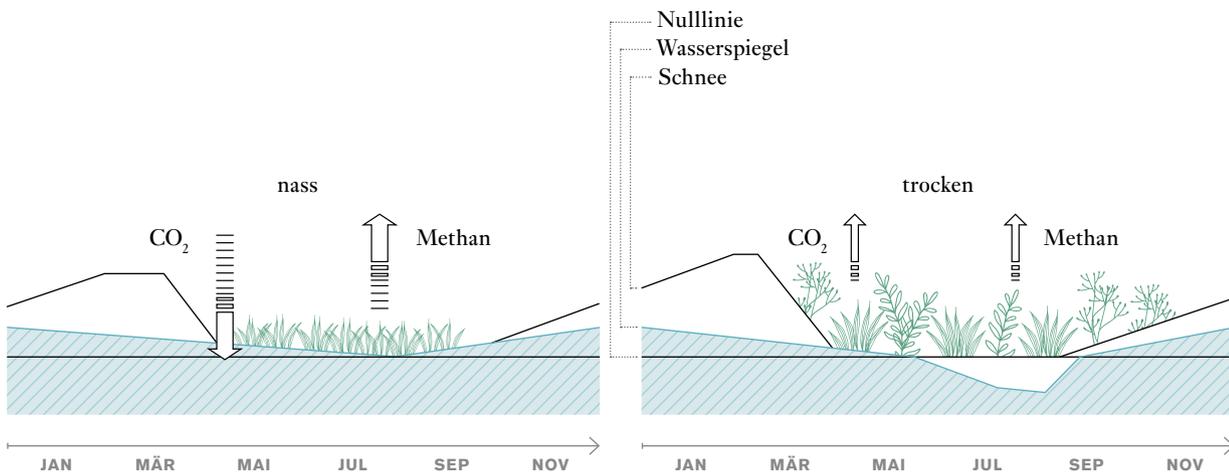




FOTO: MARTIN HEIMANN/MPI FÜR BIOGEOCHEMIE

Erodierende Permafrostklippen: Der Boden am Ufer des Kolymaflusses rutscht auf den noch gefrorenen Schichten ab und reißt organisches Material mit sich, das vom Fluss fortgespült und zu einem großen Teil zu Kohlendioxid zersetzt wird.

den Boden, sodass mehr Grün wächst und die Kohlenstoffaufnahme gesteigert wird. Zudem scharren sie im Winter den Schnee zur Seite oder verdichten ihn, was die isolierende Wirkung herabsetzt. So könnte der Permafrost trotz steigender Temperaturen gefroren bleiben.

Ob dieser Ansatz trägt, ist noch ungeklärt. Tatsächlich hat sich die Landschaftsform inzwischen erheblich verändert. Wo vorher nur einzelne hohe Grasbüschel standen, gedeiht nun eine durchgehende Vegetation. „Das Experiment hat qualitativ funktioniert“, sagt Göckede. Doch als Wissenschaftler pocht er auf verlässliche Daten. „Ich möchte Messreihen haben, und die gibt es noch nicht.“ Er selbst unterstützt das Experiment seit zwei Jahren mit sporadischen Messungen. Das seien aber nur Schnapp-

schüsse, die nicht als Nachweis gelten. „Ein großes Monitoringsystem wäre nötig.“ Obendrein bezweifelt er, dass das Verfahren im größeren Maßstab überhaupt machbar wäre. Denn der Aufwand, die Tiere herbeizuschaffen und zu versorgen, ist enorm. Dennoch sei es wichtig, derartige Ansätze zu testen. Zur Erhaltung des Permafrosts könne jeder noch so kleine Erfolg am Ende ein wichtiger Beitrag sein.

Das beste Mittel, den Permafrost zu erhalten, ist freilich ein wirksamer Klimaschutz. Der Mensch entscheidet, wie sich das Klima in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten verändert – und damit die Regionen im hohen Norden. Göckede jedenfalls ist froh, dass er diese „faszinierende Landschaft“, wie er sagt, in ihrer heutigen Form noch erleben darf. „Wer weiß, ob es sie in zwanzig, dreißig Jah-

ren noch gibt.“ Er wird den Wandel im Rahmen eines EU-geförderten ERC-Projekts weiterverfolgen. Neben den Langzeitexperimenten will er verstärkt nichtlineare Prozesse erforschen, die das Erscheinungsbild der Arktis grundlegend verändern könnten. Zum Beispiel soll es darum gehen, was bei der Entstehung eines Sees passiert – ein Vorgang, der bei zunehmender Erwärmung wohl häufiger vorkommen wird. Eine Wasserfläche hat eine ähnlich isolierende Wirkung wie eine hohe Schneedecke, sodass der Boden darunter schneller auftauen sollte. Was genau bedeutet dies für die Treibhausgasbilanz? Und was passiert, wenn der See ausläuft? Es gibt viele derartige Störungsprozesse in der Arktis, die noch weitgehend unerforscht sind. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben im hohen Norden also noch einiges zu tun.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Wenn die Permafrostböden am Polarkreis durch die Erderwärmung auftauen, könnten große Mengen Kohlendioxid und Methan freigesetzt werden und den Klimawandel verstärken.

Durch gesteigertes Pflanzenwachstum nimmt das Ökosystem mehr Kohlendioxid auf. Laut Messungen eines Max-Planck-Teams kann dies derzeit die erhöhte Aktivität von Mikroorganismen, die Kohlendioxid oder Methan freisetzen, kompensieren.

Langfristig wird die Vegetation eine Wachstumsgrenze erreichen und nicht noch mehr Kohlendioxid speichern, sodass die Emissionen durch die Mikroorganismen überwiegen dürften.