

VON CHRISTOPHER SCHRADER

Ein Hubschrauberpilot brachte den ersten Bericht von einem mysteriösen Krater mit, später meldeten Rentierhirten weitere Löcher im sibirischen Boden. Wie ausgestanzt aus dem gefrorenen Untergrund der Jamal-Halbinsel sahen sie aus: ein Dutzend Meter tief, senkrechte Wände, Durchmesser um die 30 Meter. Ringsum lagen Brocken, die irgendeine Macht weggeschleudert hatte. „Die globale Erwärmung könnte Sibirien in eine große Bombe mit Zeitzünden verwandeln“, jammerte die *Siberian Times*.

Wenn Klimaforscher in den Jahren zuvor von einer Bombe gesprochen hatten, meinten sie das im übertragenen Sinne. Es ging um die gewaltigen Vorräte von Kohlenstoff in der Biomasse, die rund um den Nordpol eingefroren sind. Taut dort der zum Teil seit Jahrtausenden gefrorene Boden, machen sich Bakterien über die Nahrungsquelle her und erzeugen die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan.

Der Permafrost genannte Untergrund der Arktis enthält nach Schätzungen doppelt so viel Kohlenstoff wie die ganze Atmosphäre. Falls dieser sich binnen kurzer Zeit – innerhalb weniger Jahrzehnte – zu Klimagasen verwandelte, gäbe es eine positive Rückkopplung: Die Erwärmung führte zu gesteigerten Emissionen, die wiederum die Erwärmung vergrößerten. Massiv steigende Temperaturen auf der ganzen Erde wären nicht mehr zu verhindern.

Das mit der Bombe war bis zu den Funden in Sibirien nur eine Redensart. Doch nun sind auf der Jamal-Halbinsel Kohlenstoff-Sprengsätze losgegangen. Entweder waren Methan-Eis-Verbindungen instabil geworden, oder der Eisdeckel über Erdgasblasen war geschmolzen, genau ist das noch nicht geklärt. In jedem Fall hatten Kohlenstoff-Verbindungen die Löcher in den Boden gerissen – nicht durch Explosionen, aber durch enormen Druck.

Bis 2100 könnten drei Millionen Quadratkilometer Boden auftauen

Die Krater sind nur ein Beispiel: In der ganzen Polarregion gibt es derzeit massive Änderungen. Der Permafrost umfasst 20 Millionen Quadratkilometer, fast ein Viertel der gesamten Landmasse. Der Klimawandel nimmt den gefrorenen Untergrund nun in den Zangenangriff. Die Bodenwärme von unten nagt ohnehin an ihm. Weil aber besonders im Winter die Temperaturen steigen, kann sich der Permafrost in der dunklen Jahreszeit weniger effektiv mit Kälte von oben aufladen. Und tatsächlich setzt die Region viel Treibhausgas frei. „Manchmal fliegen wir über die Arktis und messen Konzentrationen von Methan und CO₂ wie über Anlagen der Öl- oder Gas-Produktion in Alaska“, sagt Charles Miller von der Nasa. „Und dann gucken wir runter auf scheinbar unberührte Feuchtgebiete mit Karibu-Herden und Elchen.“

Tausende Quadratkilometer pro Jahr tauen bereits auf und zerstören dabei an der Oberfläche gebaute Pipelines, Straßen, Häuser. Auch die zunehmenden Tundra- und Waldbrände destabilisieren den gefrorenen Untergrund. Und das ist erst der Anfang: Nach Modellrechnungen könnten allein bis 2100 etwa drei Millionen Quadratkilometer vom gefrorenen in den weichen Zustand übergehen.

Die große Kohlenstoff-Bombe, über die sich Wissenschaftler sorgen, wird hingegen nach heutigem Stand des Wissens vermutlich nicht zünden. „Es gibt kein Ender-Welt-Szenario“, sagt Antoni Lewkowicz von der University of Ottawa und Präsident der International Permafrost Association, die vergangene Woche auf einer großen, internationalen Tagung in Potsdam den Stand des Wissens vorstellte. „Ein schnelles Auftauen aller Vorräte ist physikalisch nicht möglich.“ Der Kanadier warnt aber davor, die Kohlenstoffmengen der Arktis zu unterschätzen: „Permafrost ist wie ein Frachtzug: Einmal in Bewegung, ist er kaum noch zu stoppen.“

Die in Potsdam präsentierte, zentrale Einschätzung der Permafrost-Forscher, auf die Lewkowicz sich stützt, stammt aus einer *Nature*-Studie vom vergangenen



Eine Wissenschaftlerin sammelt Proben in Grönland.

FOTO: THE NEWYORKTIMES/REDDUX/LAIF

Sprengsätze am Polarkreis

Der Rückgang des Permafrosts wird große Mengen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan freisetzen. Welche Folgen haben diese Emissionen für das Weltklima?

Jahr. Demnach könnten bis zum Jahr 2100 knapp 100 Milliarden Tonnen Kohlenstoff frei werden, ein Fünftel der gespeicherten Menge. Das entspricht – aufs Jahr gerechnet – etwa einem Zehntel der momentanen Emissionen aus Kraftwerk, Schornsteinen und Auto-Auspuffen. Die daraus resultierende zusätzliche Erwärmung schätzen die Autoren auf ungefähr 0,2 Grad Celsius bis zum Ende des Jahrhunderts. Das ist ein Sechstel der noch erlaubten Erwärmung, will die Welt den Klimawandel gemäß dem Pariser Abkommen aus dem vergangenen Herbst auf zwei Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit begrenzen; 0,8 Grad sind ja schon erreicht.

Jede Netto-Freisetzung aus der Polarregion dreht die früheren Verhältnisse um. „Bis heute ist die Arktis noch eine Senke für Kohlenstoff“, sagt Guido Grosse vom Alfred-Wegener-Institut in Potsdam, der zu den Autoren der *Nature*-Studie gehörte. Weil die Landschaften sich erwärmen, erobert Pflanzen überall in Sibirien, Alaska und Kanadas Norden neuen Lebensraum und verbrauchen Kohlendioxid für die Photosynthese. Doch Grosse mahnt: „Irgendwann zwischen 2050 und 2100 verwandelt sich die Region sehr wahrscheinlich in eine Quelle für Kohlenstoff, da Treibhausgasemissionen dann die Einlagerungen von Kohlenstoff in die Pflanzen übertreffen, das zeigen Modellrechnungen.“

Doch viele Details sind noch offen. Unklar ist etwa das Verhältnis der beiden Treibhausgase CO₂ und Methan. Letzteres ist ein wesentlich potenteres Klimagas, es wirkt etwa 34-mal so stark wie Kohlendioxid. Methan entsteht, so erklären es viele Forscher, wenn Bakterien im auftauenden Permafrost keinen Sauerstoff zur Verfü-

gung haben, sie also zum Beispiel am Boden der vielen neu entstehenden Seen oder tief in durchgeweichtem Boden auf die sogenannte anaerobe Verdauung angewiesen sind.

„Viele denken, sobald es anaerob wird, kommt nur noch Methan heraus“, sagt Christina Schädel von der University of Arizona in Flagstaff. „Das stimmt aber nicht.“ Eine Woche vor dem Kongress in Potsdam hat die schweizerische Forscherin mit vielen Kollegen die Ergebnisse von 25 sogenannten Inkubationsexperimenten zusammengefasst (*Nature Climate Change*, online). Dafür wurden viele Dutzend Bodenproben aus Wald-, Tundra- und Mooren in Alaska, Kanada und Sibirien im Labor kontrolliert erwärmt: Insgesamt verdoppelte sich bei einer um zehn Grad erhöhten Temperatur die Freisetzung von Kohlenstoff-Treibhausgasen. Für die Arktis wird deshalb bei ungebremstem Klimawandel eine Erwärmung von mehr als acht Grad erwartet.

Im Süden kommen Kiefern und Fichten nur dort voran, wo der Untergrund bereits weich ist

Die Verteilung der Gase aber war unerwartet, berichtete Schädel in Potsdam: „Auch in feuchten Gebieten entsteht viel mehr CO₂.“ Unter Sauerstoff-Abschluss produzierten die Bodenbakterien nur etwa sechs Prozent Methan, und 94 Prozent Kohlendioxid. Zudem setzten die Mikroben, die Sauerstoff nutzen konnten, viel mehr Kohlenstoff um, und zwar zu CO₂. Diese Bodenproben, die aus trockenen Gebieten stammten, erzeugten einen deutlich größe-

ren Treibhaus-Effekt als die anaeroben Proben aus feuchten Regionen. Die Sorge über eine Zunahme der Gewässerfläche in der Arktis bestätigt Schädel's Team daher nicht. Allerdings ist auch klar: Wo der Boden künftig vermehrt von Pfützen, Tümpeln und Seen bedeckt ist, fließt bis zu sechsmal soviel Wärme hinein und heizt ihn stärker auf weil Wasser die Energie viel besser leitet als Luft.

Wie sich solche Ergebnisse mit Blick auf die große „Kohlenstoff-Bombe“ auswirken, ist offen. Viele der Studien, die auf dem Kongress vorgestellt wurden, zeigen ambivalente Ergebnisse. So wird außerhalb des Labors viel von dem Methan, das aus den tauenden Böden von Seen empor blubbert, noch im Wasser wieder von anderen Mikroben zersetzt, zeigte Christian Knoblauch von der Universität Hamburg am Beispiel sibirischer Tümpel. Pflanzen im Uferbereich können dem Treibhausgas indes so etwas wie freies Geleit in die Atmosphäre geben. Wenn die vergrößerten Seen größere flache, bewachsene Randzonen entwickeln, könnten sich die Verhältnisse schnell ändern.

Manche Bereiche der Arktis absorbieren aber auch erstaunlich viel Methan, berichtete Christian Juncher Jørgensen von der Universität Kopenhagen. Sein Team war mit einem mobilen Messgerät über Grönland gewandert. Selbst in der Tundra, besonders über freiliegenden Basalt-, Gneis- und Sandstein-Felsen zeigten die Instrumente einen Rückgang des Treibhausgases. Trockene Partien der Landschaft nahmen mehr auf als feuchte.

Nach bisherigen Erkenntnissen könnte eine allmähliche Umwandlung der nördlichen Tundra zu Nadelwald die Kohlen-

stoff-Aufnahme der Landschaft deutlich steigern. Doch der Vegetationswechsel hat Verspätung: An der nördlichen Waldgrenze können nur Lärchen über dem Permafrost wachsen, sie haben womöglich Probleme, genug Samen in die noch von Tundra bewachsenen Landstriche zu verteilen, sagt Ulrike Herzschuh vom Alfred-Wegener-Institut. Und im Süden kommen Kiefern und Fichten nur dort voran, wo der Boden bereits aufgetaut ist. Dort jedoch beschützen die Lärchen den Permafrost, unter anderem mit ihrem Schattenwurf. Trotz Jahrtausenden Warmzeit macht sich immer noch der Einfluss der letzten Eiszeit bemerkbar, schließt Herzschuh aus der Analyse von uralten Pollen aus einem sibirischen See (*Nature Communications*).

Vielleicht hat der Klimawandel aber auch nichts mit den Löchern in der sibirischen Tundra zu tun

Lauter solche Details muss die Forschung noch in ihr Gedankengebäude einordnen. „Wie es zusammenpasst, kann heute noch niemand sagen“, gesteht der Präsident der Permafrost-Assoziation, Antoni Lewkowicz. Er verweist auf die nächste Konferenz 2020. „In vier Jahren wissen wir bestimmt mehr, dann können wir auch die Rückwirkung auf das Klima besser abschätzen.“ Bis dahin ist vielleicht auch die Entstehung der Krater in Sibirien geklärt. Noch ist nämlich nicht ausgeschlossen, dass schon in der Vergangenheit auf diese Weise immer wieder Seen entstanden sind – und der Klimawandel im Gegensatz zu vielen anderen Phänomenen im Permafrost kaum etwas damit zu tun hat.