

**E**nde Mai färbte sich der Fluss Ambarnaja bei Norilsk plötzlich rot. Die Stadt in Sibirien, 300 Kilometer nördlich des Polarkreises, ist Kummer gewohnt – hier ist viel Schwerindustrie ansässig, die Luftqualität ist legendär schlecht. Doch eine Umweltkatastrophe dieses Ausmaßes kam auch für die hartgesotenen Einwohner unerwartet. 20.000 Tonnen Dieselöl flossen aus einem Tank, der plötzlich leckgeschlagen war, ins Wasser.

VON SARAH MARIA BRECH

Der Bergbaukonzern Nor Nickel bemühte sich erst, den Unfall zu verschleiern – selbst der russische Präsident Wladimir Putin will, so berichten es örtliche Medien, erst Tage später davon erfahren haben. Dann schob Nor Nickel die Schuld von sich. Ein Stützpfiler habe sich verschoben, hieß es, der Klimawandel sei schuld: Da der Permafrost taut, werde der Boden und damit die Anlage instabil.

Das klingt plausibel, denn tatsächlich taut der Permafrost in Sibirien immer schneller. Permafrost heißt so, weil der Boden unter einer dünnen sommerlichen Auftauschicht normalerweise das ganze Jahr über dauerhaft gefroren bleibt. Es gibt ihn in der Arktis, im Hochgebirge und auch in Teilen der Antarktis. Mit dem Klimawandel wird es in all diesen Gebieten wärmer, weswegen der Permafrost überall schwindet – was in der Tat Folgen hat für die Stabilität von Bauwerken und ganzen Ortschaften. In den Alpen beispielsweise lockern sich plötzlich die Stützpfiler von Seilbahnen, die besonders weit oben am Berg angebracht sind. In Sibirien, einer Region mit zahlreichen Gewässern, werden die Seen immer größer oder laufen sogar aus.

„Wenn man hier durchs Gelände geht, sieht man eine deutliche Erosion an den Ufern. An den Seeufern taut der Permafrost immer schneller, weswegen die Seen wachsen. Das kann in einem Sommer mehrere Meter ausmachen und in manchen Fällen genau deswegen auch zum Auslaufen der Seen innerhalb von wenigen Tagen führen“, sagt Professor Guido Grosse, der am Alfred-Wegener-Institut die Sektion Permafrostforschung leitet und häufig selbst in Sibirien die Lage untersucht. Überhaupt entwickle sich die Situation viel schneller, als es die Modelle der Wissenschaftler vorhersagen. Das liegt daran, erklärt Grosse, dass in den Modellen zwar die globalen Entwicklungen integriert sind – kleinräumige und dennoch weiter verbreitete Vorgänge wie die an den sibirischen Seen aber nicht. Diese Prozesse miteinzubeziehen erfordert sehr aufwendige und datenintensive Berechnungen, mit denen die Forscher erst allmählich beginnen.

Vor Ort sind die Veränderungen bereits sichtbar. Sogar Putin, nicht unbedingt als leidenschaftlicher Klimaschützer bekannt, hatte im Dezember vor einer „ernsten Situation“ gewarnt, wenn der Permafrost in den Städten nördlich des Polarkreises taut. Ob das Leck im Dieseltank tatsächlich Folge des Klimawandels ist, ist noch ungeklärt. Es könnte auch ein Unfall infolge schlechter Wartung gewesen sein. Nor Nickel hat dazu keine Daten veröffentlicht. „Möglich wäre, dass Permafrost beigetragen hat“, sagt Grosse.

# TAUEN

## Das große

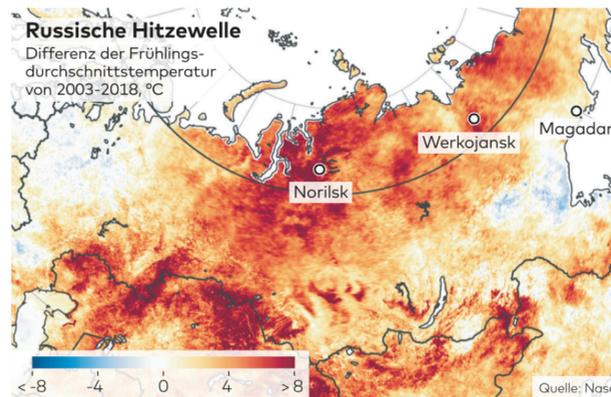
Sibirien leidet unter einer Hitzewelle, Waldbränden und schwindendem Permafrost. Hohe Temperaturen sind zwar in der Region im Sommer nicht ungewöhnlich – doch in diesem Jahr kommt einiges zusammen



Ein ungewöhnliches Satellitenbild vom April 2019: Feuer (rot) umgeben von Eis in der Region Magadan

„Aber: Es taut dort seit zwei Jahrzehnten, die Infrastruktur ist dadurch einfach gefährdeter, und das müssen Verantwortliche wissen und anerkennen. Sie können es also nicht einer plötzlichen Überraschung durch tauenden Permafrost in die Schuhe schieben.“

Dass die Nachricht vom roten Ambarnaja um die ganze Welt ging, liegt nicht nur an den spektakulären Umständen. Sie fügt sich in eine ganze Reihe von Katastrophenmeldungen aus der Region. Seit Februar herrscht im mittleren und nördlichen Sibirien eine Hitzewelle. Zwischen Januar und Mai lagen die Temperaturen acht Grad Celsius über dem Durchschnitt, errechnete das US-amerikanische Institut Berkeley Earth. In der Stadt Werkojansk wurden am 20. Juni sogar 38 Grad gemessen – das wäre, wenn die UN-Wetterorganisation es verifiziert, ein neuer lokaler Rekord. Hitze in Sibirien klingt unwirklich, ist es aber nicht. In der Region kann es im Sommer ganz schön heiß werden. Über 30 Grad sind durchaus keine Seltenheit. „Eine solche Wetterlage ist ungewöhnlich, aber nicht extrem“, sagt Professor Andreas Fink, der am Karlsruher Institut für Technologie zu atmosphärischer Dynamik forscht. Man könne sie größtenteils mit der nor-



malen Wettervariabilität erklären. Der Strahlstrom, auch Jetstream genannt, der um den Pol weht, war nämlich in diesem Frühjahr recht stabil.

Strahlstrom und extreme Temperaturen hängen folgendermaßen zusammen: Wenn der Jetstream schwächelt – was er wegen des Klimawandels, so wird von einigen Klimaforschern vermutet, immer häufiger tut –

schlägt er Wellen. In deren Ausbuchtungen können sich Wetterlagen lange halten, und es gerät warme Luft aus dem Süden in den Norden. In diesem Jahr gab es aber wenige von diesen Ausbuchtungen, denn der Strahlstrom wehte stark. Über Mittelsibirien, so Fink, habe es zwar durchaus eine Tendenz zu einer persistenten Hochdrucklage gegeben – diese Tendenz sei allerdings nur leicht erhöht gewesen.

”

DIESE WETTERSITUATION VOLLZIEHT SICH VOR DEM HINTERGRUND EINER BEREITS ERHÖHTEN TEMPERATUR

ANDREAS FINK  
Karlsruher Institut für Technologie

Haben die ungewöhnlichen Temperaturen also gar nichts mit der Erderwärmung zu tun? Nein, so einfach ist es leider nicht. „Diese ungewöhnliche Wittersituation vollzieht sich ja vor dem Hintergrund einer bereits erhöhten Temperatur“, erklärt Fink. „Die Wahrscheinlichkeit für hohe Temperaturen ist in der Arktis inzwischen etwa doppelt so hoch wie noch vor 50 Jahren.“

Die Arktis erwärmt sich schneller als der Rest der Erde, im Schnitt doppelt so schnell. Das liegt vor allem an einer sogenannten positiven Rückkopplung. Schnee, eine weiße Fläche, reflektiert das Sonnenlicht zurück. Wasser und Boden nehmen den größten Teil der einfallenden Sonnenenergie auf, wodurch sich die Atmosphäre erwärmt und Schnee schmilzt. Dadurch gibt es mehr dunkle Flächen, die wiederum weniger Sonnenlicht reflektieren.

Allerdings betrifft diese Eis-Albedo-Rückkopplung vor allem den Bereich des Nordpolarmeers, Grönland und Kanada, weniger Mittelsibirien. „Hier wirkt sich die Erderwärmung eher so aus, dass der Schnee im Frühjahr früher schmilzt“, erklärt Fink. Diese Entwicklung hat vermutlich auch zur dritten Umweltkatastrophe beigetragen, die sich gerade in Sibirien entwickelt: den Waldbränden. Laut staatlichem Forstschutzdienst brennt inzwischen eine Fläche von mehr als einer Million Hektar, in Teilen der Region Magadan wurde bereits der Ausnahmezustand ausgerufen.

Unmittelbare Ursachen der Brände sind vermutlich Gewitter mit Blitzschlag und brennende Torfböden oder Kohleflöße. Wenn aber die Temperatur steigt und der Schnee frühzeitig schmilzt, ist der Wald trockener – weswegen er leichter brennt. So begünstigt der Klimawandel Waldbrände. Die wiederum wirken sich auf die Temperaturen in der Umgebung aus – und auf den Permafrost. Das Problem ist dabei nicht, dass die Feuer den Frost direkt tauen lassen. „Viel schlimmer ist, dass Vegetation und Torfschicht wegbrennen“, sagt Permafrost-Forscher Grosse. „Diese schützen den Boden vor der sommerlichen Wärme. Man kann das ganz genau beobachten: Ein paar Jahre nach einem solchen Brand beginnt der Permafrost sichtbar zu tauen, und die Landschaft verändert sich stark durch unregelmäßige Absackungen.“

Das wiederum verstärkt den Klimawandel. Denn im Permafrost liegt organisches Material, Kohlenstoff, gespeichert aus Zehntausenden von Jahren. Selbst die Überreste von Mammuts lassen sich dort finden. Wenn der gefrorene Boden auftaut, beginnen Mikroben das organische Material zu zersetzen. Dabei entstehen Treibhausgase, die wiederum die Erderwärmung vorantreiben: in trockenem Boden Kohlendioxid, in feuchtem Boden das noch viel stärker wirkende Methan. 1600 bis 1700 Gigatonnen Kohlenstoff sind dort gespeichert – das ist doppelt so viel, wie sich aktuell in der Atmosphäre befindet. Der auftauende Permafrost wird bis zum Ende des Jahrhunderts ein bis zwei Zehntelgrad zur Erderwärmung beitragen, schätzen Forscher.

Um herauszufinden, wie es um den Permafrost steht, hat das Globale Terrestrische Netzwerk für Permafrost in den betroffenen Regionen Hunderte Bohrlöcher gebohrt, einige zehn, andere mehrere Hundert Meter tief. Mit diesem Netzwerk wurde nachgewiesen, dass sich der Permafrost in zehn bis 20 Meter Tiefe global allein in der Periode 2007 bis 2016 schon um etwa 0,3 Grad Celsius erwärmt hat. Temperatursensoren übertragen die Daten teils in Echtzeit, andere werden einmal im Jahr von Forschern vor Ort ausgelesen. Dazu gehören auch die in Sibirien. Welche Auswirkungen Hitzewelle und Waldbrände auf den dortigen Permafrost haben – das wird man erst im nächsten Jahr genau sagen können.

## Überraschung der Steinzeit

Auf einer ostsibirischen Insel erforschen Archäologen eine Steinzeitsiedlung. Die Funde offenbaren, dass bereits vor 9500 Jahren Schlittenhunde gezüchtet wurden

Der Wille zur Eroberung der Welt ist groß, und kein Ort scheint zu rau, zu kalt, zu lebensfeindlich, als dass der Mensch sich dort nicht schon vor Tausenden von Jahren niedergelassen hätte. Aber so, wie er heute Funktionskleidung, Handwärmer und Generatoren braucht, schaffte er es auch in der Steinzeit ohne ein paar Helfer nicht. Genauer gesagt: ohne vierbeinige Helfer.

VON ROLAND KNAUER

Bereits seit 1989 graben Wladimir Pitulko von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Sankt Petersburg und seine Kollegen auf der Schochow-Insel in der Ostsibirischen See die Reste einer Steinzeitsiedlung aus. Überraschende neue Funde erzählen dabei mehr über das Leben der damaligen Bewohner. So fanden sie in der Siedlung beispielsweise die Reste eines Mammuts und viele Feuersteine. Ein deutlicher Hinweis darauf, dass der sibirische

Steinzeitmensch Grillfleisch gegenüber nicht abgeneigt war.

Die Wissenschaftler fanden zudem viele Knochen und Zähne kleinerer Tiere, denen sie zunächst aber keine große Aufmerksamkeit schenkten. Im Jahr 2003 beförderten sie dann den linken Unterkieferknochen eines Hundes zutage. Er war so gut erhalten, dass sich ein Team um Mikkel Sinding vom Globe Institut der Universität Kopenhagen daranmachte, alte DNA daraus zu isolieren. Der Versuch glückte – und offenbarte eine neue Facette der sibirischen Steinzeitmenschen.

Der Hund von Schochow ist offenbar ein Vorfahre der heute in Sibirien und Alaska lebenden Huskys. Bestens an die Kälte, an Strapazen und Arbeit gewöhnt, sind sie noch immer die beliebtesten Schlittenhunde.

Dass die Tiere vor fast 10.000 Jahren ebenfalls schon als Zugtiere eingesetzt worden sind, zeigt ein weiterer Fund an der Ausgrabungsstätte: Wladimir Pitulko und seine Kollegen haben dort Über-

reste einer Schlittenkufe sowie weitere aus Treibholz gefertigte Teile von Schlitten ausgegraben. Offensichtlich diente das Vehikel als Lieferwagen für Jagdbeute und auch für Feuersteine, aus denen damals Klingen, Speerspitzen und andere Dinge für den alltäglichen Gebrauch hergestellt wurden. Feuersteine aber mussten die Menschen von der 180 Kilometer entfernten Insel Neusibirien und zwei großen Nachbarinseln holen – in der Region der heutigen Schochow-Insel kommt das Gestein nicht vor. Bei diesen Gewaltmärschen dürften die frühen Schlittenhunde gute Dienste geleistet haben.

Mikkel Sinding und seine Kollegen konnten eine Reihe von Genen identifizieren, die den Hunden das Leben in der Kälte des Nordens erleichterte. So konnten die Schlittenhunde vor 9500 Jahren, anders als viele heute lebende Hunderassen, kaum Stärke verdauen, die etwa von Kartoffeln und anderen Pflanzen als Energiespeicher genutzt wird. Der Steinzeithusky war auf

Fleisch und Fett gepolt. Ein Vorteil, denn bei den Steinzeitmenschen des hohen Nordens gab es nachweislich kaum pflanzliche Nahrungsmittel – es gab kaum Weiche. Stattdessen deckten sie ihren Energiebedarf vor allem über Mammuts, Rentiere und andere Beutetiere der Tundra.

Die Erforschung der Hundeknochen aus Sibirien hielt aber noch eine weitere Überraschung bereit: Die Tiere waren nämlich keine wild zusammengewürfelte Meute, sondern gehörten zu zwei unterscheidbaren Rassen. Offenbar hatten sich die Steinzeitmenschen bereits in der Hundezucht geübt.

Der Archäologe Wladimir Pitulko beschreibt, dass die Hunde der einen Rasse wohl große, bis zu 30 Kilogramm schwere Tiere waren. Sie ähneln den modernen Alaskan Malamute, die heutzutage meist besonders schwere Lastschlitten ziehen müssen. In der Steinzeit dagegen ging diese sehr kräftige Rasse mit den Menschen sehr wahrscheinlich eher auf Rentierjagd.

Die Tiere der anderen Hunderasse waren graziler, sie wogen 16 bis 25 Kilogramm und ähnelten mit einer Schulterhöhe von etwa 55 Zentimetern den modernen Siberian Huskys, die noch heute als Schlittenhunde eingesetzt werden.

Der hohe Stellenwert, den die Schlittenhunde für die sibirischen Steinzeitmenschen gehabt haben dürften, wird klar, wenn man sich die damaligen Umweltbedingungen vor Augen führt. Von den Gletschern der Eiszeit waren noch viel größere Reste übrig, der Meeresspiegel war viel niedriger als heute. Dadurch waren viele Inseln, auch die heute 600 Kilometer nördlich der Küste gelegene Schochow-Insel, noch mit dem Festland verbunden. Damals taute dort der Dauerfrostboden während der zwei oder drei Sommermonate mit nur wenig über dem Gefrierpunkt liegenden Temperaturen zu einer zehn bis fünfzehn Zentimeter dicken Schlamm- schicht auf. Kurzum: Jagen, wandern und reisen dürften extrem mühselig ge-

wesen sein. Aber auch in den kalten Monaten wurde es nicht besser. Dann war der Boden hartgefroren und oft mit Schnee bedeckt.

Einzig der Einsatz von Schlitten und Schlittenhunden dürfte das Fortkommen sehr erleichtert haben. Und wie wichtig Mobilität bereits in der Steinzeit gewesen ist, zeigt ein weiterer Fund: Auf der Schochow-Insel wurden Klingen aus vulkanischem Obsidian gefunden, die vom 1500 Kilometer entfernten Krasnoje-See stammten.

Die Steinzeitmenschen waren sich durchaus bewusst, was sie an ihren vierbeinigen Gefährten hatten. Darauf lässt zumindest der Schädel eines Hundes schließen, dessen Zähne völlig abgekaut gewesen sind. Es muss sich um ein besonders altes Tier gehandelt haben, das für die Menschen eher eine Last denn ein Helfer gewesen sein dürfte. „Werden solche alten Tiere trotzdem weiter gefüttert“, erklärt Wladimir Pitulko, „dann müssen ihre Besitzer sie schon sehr ins Herz geschlossen haben.“