

IM HOHEN

NORDEEN

IM HOHEN NORDEN

WENN DIE KLIMAWÜSTE AUFTAUT

INGA BECK

Hoch im Norden Kanadas stehen die Zelte eines Forschungscamps, in dem Heidelberger Wissenschaftler die Folgen des Klimawandels erkunden. Mit modernsten Instrumenten vermessen sie kleinste Veränderungen der Bodenoberfläche. Dazu kommt es, weil Permafrostböden auftauen.

D

Der vergangene Winter war einer der mildesten, seit Wissenschaftler das Wetter beobachten. Besonders warm fiel der Winter laut amerikanischer Wetterbehörde in Europa und Russland aus. Bereits im Dezember des Jahres 2015 wurden beispielsweise in Deutschland Temperaturen gemessen, die weit über dem Mittel der Jahre von 1981 bis 2010 lagen – in Augsburg, Lahr, Stötten und Stuttgart sogar über 100 Prozent. Bei einem solchen „Winter“ kann es sich um eine Ausnahme handeln, wie man ihn in Deutschland das letzte Mal 1974/1975 erlebt hat. Die zusätzliche Beobachtung aber, dass unsere Winter seit dem Jahr 1980 stetig um etwa ein Grad Celsius wärmer werden, deutet darauf hin, dass Europa die Klimaerwärmung zu spüren bekommt.

In der Arktis und in der Antarktis sind die Effekte der Klimaerwärmung schon länger und deutlicher sichtbar: Seit vielen Jahren weisen Wissenschaftler auf die Reduktion des Eises rund um den Nordpol hin und beobachten



DR. INGA BECK studierte Physische Geographie an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Im Jahr 2008 begann sie während ihrer Doktorarbeit eine Zusammenarbeit mit dem Institut National de la Recherche Scientifique in Quebec, Kanada. Der wissenschaftliche Fokus lag auf der Analyse von Fernerkundungsdaten zur Detektion von Permafrost in der östlichen Subarktis Kanadas. Anschließend war sie als Executive Director der Internationalen Permafrost Gesellschaft am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) tätig. Seit dem Jahr 2014 arbeitet sie wieder an ihrem Forschungsthema, zunächst als Postdoktorandin am AWI und seit vergangenem Jahr am Geographischen Institut der Universität Heidelberg. Zudem ist sie Mitglied des Heidelberg Center for the Environment (HCE). Ihr derzeitiges Projekt PermaSAR wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und dem Bundesministerium für Wirtschaft finanziert.

Kontakt: inga.beck@uni-heidelberg.de

das Abbrechen großer Eisschelfe in der Antarktis, etwa des Larsen-Schelfeises. Auch ein starkes Abschmelzen vieler Eisflächen im Inland und von Gletschern wurde in den vergangenen Jahren gemessen.

Eine weitere Folge der global steigenden Temperaturen ist, dass die Permafrostböden auftauen. Als „Permafrostboden“ werden all jene Bereiche des Bodens bezeichnet, in deren Untergrund über mindestens zwei Jahre hinweg ständig Temperaturen von unter null Grad Celsius herrschen. Solche Böden bedecken rund 25 Prozent der nördlichen Hemisphäre. Wenn diese Böden auftauen, zieht das weitreichende Folgen nach sich: Zum einen werden mehr Treibhausgase ausgestoßen, zum Zweiten verändert sich die Landbedeckung wie zum Beispiel die Vegetation und zum Dritten sackt die Bodenoberfläche ab. Es ist hier wichtig, von „auftauen“ zu sprechen und nicht von schmelzen: Der Boden taut tatsächlich auf wie gefrorenes Gemüse aus dem Gefrierfach – er schmilzt nicht.

Herauszufinden, wo überall auf der Welt und in welchem Ausmaß Permafrostböden auftauen, ist eine aktuelle und wichtige Frage der Polarforschung. Wissenschaftler haben dazu dauerhafte Messinstallationen und tiefe Bohrlöcher in der Arktis geschaffen und bestimmen dort die Bodentemperaturen. Zahlreiche internationale Projektgruppen versuchen mit neuesten Methoden, die Menge an Kohlenstoff im Boden sowie dessen Emission und Akkumulation zu quantifizieren. Zudem sollen die Daten von Satelliten dabei helfen, die betroffenen Regionen zu identifizieren. Auch die Universität Heidelberg arbeitet an einem solchen Vorhaben: Das Projekt „PermaSAR“ der Abteilung Geoinformatik des Geographischen Institutes nutzt Satelliten-Radardaten und terrestrische Laserdaten, um ein Absacken der Bodenoberfläche möglichst schnell und genau zu quantifizieren.

Das Schicksal der Permafrostböden

Unser Projekt „PermaSAR“ ist ein gemeinschaftliches Vorhaben von Wissenschaftlern des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg und der Abteilung Periglazialforschung des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung in Potsdam. Die Kooperation vereint die beiden wichtigsten Kompetenzen zur Detektion von Permafrostböden: die Geoinformatik und das Wissen über den Permafrost. Die Arbeiten werden für drei Jahre vom Bundesministerium für Wirtschaft und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt gefördert. Ziel des Projektes ist es, örtliche veränderte Höhen der Oberfläche, die auf ein Auftauen des Permafrostbodens hinweisen, mithilfe von Satellitendaten zu erkennen.

Die Höhenveränderungen der Oberfläche werden von den Auftauprozessen im Boden hervorgerufen: Weil die gefrorene Substanz im Boden taut, verringert sich das

Volumen – genau in diesen Bereichen verliert die Oberfläche an Höhe, es kommt zu Absackungen. Absackungen, die aufgrund des Auftauens der Böden zu beobachten sind, treten in vielen Regionen üblicherweise auch jedes Jahr im Verlauf der Jahreszeiten auf: Wenn die Temperaturen im Sommer hoch genug werden, um ein oberflächliches Auftauen der Böden zu verursachen, lässt sich eine Reduktion der Erdoberfläche von einigen Zentimetern messen. Über die Wintermonate gefriert der Boden dann wieder – und die Erdoberfläche hebt sich an. Wie stark diese jahreszeitlich zu messenden Schwankungen ausfallen, hängt von der Dicke des „Active Layer“ und dessen Eisgehalt ab. Als „Active Layer“ bezeichnet man in der Fachsprache die Tiefe der Schicht, die von der Erdoberfläche bis hin zum gefrorenen Bereich reicht. Diese Schicht kann über einen Meter umfassen.

Durch den Abfluss von Wasser während des Auftauens wird das Absinken des Bodens zusätzlich verstärkt. Dann kann es auch zu abrupten Einstürzen kommen. Es wird vermutet, dass sich ein solcher Einsturz beispielsweise im Jahr 2015 in Yamal, einer Halbinsel in Sibirien, ereignete. Dort bildete sich innerhalb von kurzer Zeit ein Krater mit einem Durchmesser von bis zu 80 Metern. Zumeist aber spielen sich die Oberflächenbewegungen des Bodens in der Größenordnung von Zentimetern ab.

Um solch kleine Veränderungen im Bereich von wenigen Zentimetern messen zu können, bedarf es Aufnahmetechniken vor Ort, den sogenannten Subsidenzstationen. Hier können Bewegungen und Absackungen im Zentimeterbe-

Vernetzte Umweltwissenschaften

Das Heidelberg Center for the Environment (HCE) vernetzt die bestehenden Kompetenzen in den Umweltwissenschaften an der Universität Heidelberg. Ziel des Zentrums ist es, über Fächer- und Disziplinengrenzen hinweg den existenziellen Herausforderungen und ökologischen Auswirkungen des natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Wandels auf den Menschen wissenschaftlich zu begegnen. Dabei setzt das HCE gezielt auf eine enge interdisziplinäre und integrative Zusammenarbeit, da die Komplexität und die kulturelle Gebundenheit der heutigen Umweltprobleme das Analyseraster einzelner Methoden oder Disziplinen sprengen. Mit ihren vielfältigen Einrichtungen und Kompetenzen in den Umweltwissenschaften sticht die Universität Heidelberg, auch international, als ein Ort heraus, an dem diese Gesamtsicht auf die Umwelt entwickelt und gleichzeitig in die Lehre und den öffentlichen Diskurs eingebracht werden kann.

www.hce.uni-heidelberg.de

reich aufgenommen werden, was auf die Dynamik des Bodens schließen lässt. Solche „In-situ“-Messverfahren haben einige Nachteile – vor allem dann, wenn es sich um Geräte handelt, die manuell abgelesen werden müssen. In diesen Fällen ist die räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen oft nicht ausreichend. Da die betroffenen Gebiete in der Regel nur schwer zugänglich sind und eine permanente Instrumentierung logistisch sehr aufwendig und kostspielig ist, beschränken sich die Messungen häufig auf sehr kleine Testgebiete und das Ablesen findet nur selten statt.

Blick von oben

Wir versuchen deshalb in unserem Projekt PermaSAR, das Problem der unzureichenden räumlichen und zeitlichen Auflösung der Messdaten zu lösen, indem wir flächendeckende Daten von Satelliten verwenden. Unsere Daten stammen von dem Satellitenpaar „TerraSAR-X“ und „TanDEM-X“. Es umkreist die Erde in 514 Kilometern Entfernung und nimmt alle elf Tage dieselbe Region auf. Das erlaubt es nicht nur, eine große Fläche zu betrachten, es ermöglicht auch eine höhere Messfrequenz.

TerraSAR-X und TanDEM-X, zwei deutsche Erdbeobachtungssatelliten, sind baugleich und jeweils mit einem Radarsensor ausgestattet. TerraSAR-X ist schon seit dem Jahr 2007 im All unterwegs, TanDEM-X wurde drei Jahre später auf seine Reise geschickt. Seither fliegen beide in einem fast identischen, sonnensynchronen Orbit. Ihre Radarsensoren arbeiten im Wellenlängenbereich des X-Bandes. Die Wellenlänge bezeichnet die Länge der vom Satelliten ausgesandten Strahlen; beim X-Band handelt es sich um eine relativ kleine Wellenlänge von circa drei Zentimetern. Zum Vergleich: In der häuslichen Mikrowelle werden Wellenlängen von etwa zwölf Zentimetern erreicht. Der Satellit „bestrahlt“ einen Ausschnitt der Erdoberfläche und bekommt via Rückstreuung ein Signal zurück. Die Zeit, die das Signal benötigt, um zum Satelliten zurückzukehren, ist abhängig von der Entfernung des „beschossenen“ Objekts: Je weiter entfernt das Objekt ist, desto länger dauert es, bis das Signal zum Satelliten zurückkommt.

Mit den beiden Satelliten ist es möglich, zum gleichen Zeitpunkt den gleichen Ort aus leicht unterschiedlichen Winkeln aufzunehmen. Dadurch kommt es zu einer „Interferenz“, zu einer Verlagerung der beiden Wellen. Was man erhält, ist ein „Interferogramm“. Mit dessen Hilfe lässt sich die Höhe des Objekts berechnen. Je kleinere Wellenlängen ausgesendet werden, desto genauer wird die räumliche Auflösung. Mit kürzeren Wellenlängen können dementsprechend kleinere Höhenunterschiede erfasst werden. Um die Höhenunterschiede zwischen zwei Zeitpunkten zu bestimmen, benötigt man zwei Interferogramme. Die Differenz enthält die gewünschte Information über mögliche Höhenveränderungen. Der Fachmann spricht von „differenzieller Interferometrie“.

„Mithilfe innovativer Messmethoden wollen wir örtlich veränderte Höhen von Oberflächen erkennen, die auf ein Tauen von Permafrostböden hinweisen.“

In der kanadischen Arktis

Zur Evaluierung der Methode erfolgen zunächst Messungen am Boden, die dann mit den Ergebnissen der differentiellen Interferometrie verglichen werden. Zu diesem Zweck war das „PermaSAR-Team“ im Jahr 2015 zwei Mal im Testgebiet Trail Valley Creek im Nordwesten von Kanada, etwa 50 Kilometer nördlich von der Stadt Inuvik entfernt (68°45'N, 133°30'W). Aufgrund der Lage in der arktischen Tundra ist das Gebiet sehr gut für unsere Studie geeignet. Es ist etwa 62 Quadratkilometer groß und befindet sich an der nördlichen Grenze des borealen Nadelwaldes, der in eine Landschaft übergeht, die überwiegend mit kleinen Bodensträuchern, Gras, Flechten und Moosen bewachsen ist. Die spärliche Vegetation ist die Antwort auf das Klima: Die Sommer sind kurz, das Gebiet ist nur vier Monate im Jahr schneefrei. Mit einer mittleren Jahrestemperatur von minus zehn Grad Celsius (zum Vergleich Heidelberg: plus 11,1 Grad Celsius) und einer Niederschlagsmenge von knapp 270 Millimetern (zum Vergleich Heidelberg: 745 Millimeter) lässt sich die Region als „Kältewüste“ beschreiben. In den Sommermonaten können Temperaturen von deutlich über plus zehn Grad erreicht werden: Dann taut die obere Bodenschicht bis zu circa 60 Zentimeter tief auf. Das macht das Gebiet für unsere Fragestellung interessant.

Um von der Stadt Inuvik in unser Forschungscamp in Trail Valley Creek zu gelangen, muss man mit dem Hubschrauber über die kanadische Tundra fliegen. Ob und wann das möglich ist, hängt sehr vom Wetter ab, und das Gewicht der Ausrüstung muss genau kalkuliert werden. Im Camp steht ein wetterfestes und beheizbares Zelt, in dem sich zehn Personen aufhalten können. Hinzu kommen Zelte für Essensvorräte und Geräte sowie die Schlafzelte der Wissenschaftler. Umgeben ist das Camp von einem elektrischen Zaun, um Menschen und Nahrung vor Braunbären zu schützen. Mit der Außenwelt können wir im Camp ausschließlich über ein Satellitentelefon kommunizieren. Die Arbeitstage sind lang und intensiv: Die Lage im hohen Norden ermöglicht uns Messungen fast rund um die Uhr, da es in der Nacht kaum dunkel wird. Zudem will jede Schönwetterminute genutzt sein, da einige der Instrumente nur bei Trockenheit zuverlässig funktionieren.

Am Boden lesen wir Höhenveränderungen punktuell mithilfe der Subsidenzstationen ab. Darüber hinaus nehmen wir terrestrische 3D-Laserscandaten und „GNSS“-Daten auf, also Daten vom „Global Navigation Satellite System“. Die Satelliten des GNSS kommunizieren untereinander mittels Funkcode und teilen sich ihre genaue Position und Uhrzeit mit. Um die exakte Lage eines Empfängers zu bestimmen, muss er das Signal von mindestens vier Satelliten bekommen. Mit dem Laserscanner wird die Umgebung in einer Reichweite bis zu 600 Metern im Infrarotbereich und mit einer Frequenz bis zu 300 Kilohertz „abgescannt“. Dabei werden Laserpulse ausgesendet, um

„Die räumliche und zeitliche Auflösung bisheriger Messungen ist oft unzureichend. Wir verwenden daher zusätzlich die Daten zweier Satelliten.“

IN THE FAR NORTH

WHEN THE CLIMATE DESERT THAWS

INGA BECK

A quarter of the northern hemisphere is covered by permafrost soils. The lower strata of these soils are characterised by permanent temperatures below zero degrees Celsius in at least two consecutive years. Climate change and the resulting rise in global temperature, however, is leading to an increased thawing of the permafrost soils. This has a number of serious consequences: More greenhouse gases are released into the atmosphere, the land cover changes and the soil surface above the permafrost begins to sink.

Finding out where in the world and to what extent permafrost soils are thawing is currently an important challenge for polar research. Heidelberg University's Institute of Geography is also involved in this undertaking: We are conducting the 'PermaSAR' research project in cooperation with researchers of the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research in Potsdam. Since the spatial and temporal resolution of current measurement methods is often insufficient to precisely document the thawing of the soils, we use additional data from two satellites. Not only does this allow us to look at a larger area, it also gives us a higher measuring frequency. In order to validate the findings of these radar satellites we need ground-truth data. Consequently, we chose a test site in the Northwest Territories of Canada, 50 kilometres north of Inuvik. Our first results show the expected subsidence over the year, and initial calculations based on the radar images are promising. However, further investigation and analyses are necessary to appropriately evaluate this approach. ●

DR INGA BECK studied physical geography at LMU Munich. While working on her PhD thesis in 2008, she began cooperating with the Institut National de la Recherche Scientifique in Quebec, Canada. The purpose of this cooperation was to use remote sensing data to detect permafrost in the eastern subarctic region of Canada. Dr Beck went on to become Executive Director of the International Permafrost Association at the Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research (AWI). In 2014 she returned to working on her research topic, first as a postdoc at the AWI and then at Heidelberg University's Institute of Geography, which she joined last year. She is also a member of the Heidelberg Center for the Environment (HCE). Her current project PermaSAR is financed by the German National Aeronautics and Space Research Centre (DLR) and the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

Contact: inga.beck@uni-heidelberg.de

“Finding out where in the world and to what extent permafrost soils are thawing is currently an important challenge for polar research. For this purpose we use innovative measurement methods such as data from two satellites.”

über die Laufzeit des Laserpulses die Distanz zum reflektierenden Objekt ermitteln zu können. Das Ergebnis ist eine hoch präzise dreidimensionale Punktwolke. Die zusätzliche Aufnahme von einzelnen Punkten mit dem GNSS liefert einen weiteren sehr präzisen Datensatz. Um die Höhenbewegungen den physikalischen Prozessen im Boden zuzuordnen, bestimmen wir zudem die Luft- und Bodentemperatur sowie die Bodenfeuchte und messen die Tiefe des Active Layers.

Wichtiger Beitrag zur Klimafolgenforschung

Schon unsere ersten Ergebnisse der Feldexperimente aus dem Jahr 2015 zeigen, dass sich die Bodenoberfläche saisonal verändert hat: Zwischen der ersten Expedition, die Anfang Juni stattfand, und der zweiten Expedition Ende August hat sich der Boden um einige Zentimeter gesenkt. Dies machen sowohl die manuell abgelesenen Subsidenzstationen, die Auswertungen der Laserscans und die Daten des GNSS sichtbar. Zeitgleich zu den Messungen am Boden hat das Satellitenpaar im All Radarbilder von der Region aufgenommen. Es handelt sich um 15 Aufnahmen aus zwei verschiedenen Orbits. Die Auswertung dieser Bilder läuft derzeit auf Hochtouren. Eine bereits erfolgte detailliertere Sichtung der Daten und eine Proberechnung deuten auf eine sehr gute Qualität der Aufnahmen hin und versprechen schon heute aussagekräftige Resultate. Die konkrete Frage, ob die am Boden gemessenen Höhenunterschiede auch in den differenziellen Interferogrammen zu sehen sind, hoffen wir ebenfalls bald beantworten zu können. Sollte dies der Fall sein, wird es in Zukunft möglich sein, das Auftauen der Permafrostböden und dessen Dimension großflächig zu erfassen. Diese Methode wäre auch in anderen arktischen Gegenden anwendbar, in denen mögliche Höhenveränderungen von großem Interesse für die Wirtschaft und die ansässigen Gemeinden sind – so zum Beispiel auf den Trassen von Pipelines und anderer Infrastruktur, denen Bodenbewegungen gefährlich werden könnten.

Neben den wirtschaftlichen Interessen sind für uns jedoch in erster Linie die Erkenntnisse für die Wissenschaft bedeutsam: Wenn es möglich ist, mit unserem Vorgehen großflächig abzuschätzen, wo und wie stark die Permafrostböden auftauen, wäre das ein wichtiger Beitrag zur Klimafolgenforschung. Dadurch könnten nicht nur die direkten Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den gefrorenen Boden besser quantifiziert werden, sondern es ließen sich auch genauere Aussagen darüber treffen, welche Mengen der im Permafrost gespeicherten Treibhausgase durch das Auftauen freigesetzt werden. Dies wiederum könnte die Prognosen für eine Erwärmung präzisieren. ●

**„Unsere Feld-
experimente aus 2015
zeigen, dass sich
die Bodenoberfläche
verändert hat:
Zwischen Anfang Juni
und Ende August
sank der Boden um
einige Zentimeter ab.“**