

GEOFOKUS



Brennpunkte der Antarktisforschung

Norbert W. Roland*

Antarktisforschung galt noch in den 1980er Jahren als eine sehr exotische Wissenschaftsdisziplin, als eine sehr teure und eigentlich etwas weltfremde dazu. In der Tat, es wurde in einer fremden Welt geforscht, auf einem bis dato wenig bekannten Kontinent der Erde. Nun ist es Pflicht der Forschung, bis dato Unbekanntes zu erforschen. Die Frage cui bono – wem nützt es – wurde dennoch nicht selten gestellt, selbst innerhalb der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. Sie ist zuständig für die Abdeckung der Geoforschung auf dem Kontinent und ergänzt damit das Forschungsspektrum des Alfred-Wegener-Institutes (AWI), Bremerhaven. Dabei wurde zeitweilig vordergründig auf die Industrienähe der Polarforschung geschaut – bzw. auf die Industrieferne, nachdem durch das 1998 in Kraft getretene Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag Bergbau in der Antarktis für 50 Jahre verboten ist. Der Ansatz „Keine Rohstoffgewinnung – also keine gesellschaftspolitische Relevanz“ ist allerdings zu kurz gegriffen. Es ist verständlich, wenn in Zeiten knapper Kassen das cui bono in den Vordergrund rückt. Aber man kann Forschungsansätze im Voraus nicht nur nach dem möglichen monetären Ergebnis einer späteren Verwendbarkeit der Forschungsergebnisse beurteilen. Dies gilt vor allem für Grundlagenforschung.

Seit den 1980er Jahren gab es jedoch zahlreiche neue Erkenntnisse, die der Polarforschung generell und der Antarktisforschung insbesondere neue Bedeutung verliehen, reichten doch ihre Ergebnisse weit über den lokalen Rahmen hinaus und erlangten weltweite Bedeutung. Nicht zuletzt durch das Internationale Polarjahr 2007–2008 wurde die Bedeutung der Polgebiete der Erde für die Menschheit herausgestellt. An dieser Stelle sollen daher exemplarisch einige Forschungsschwerpunkte kurz dargestellt werden.

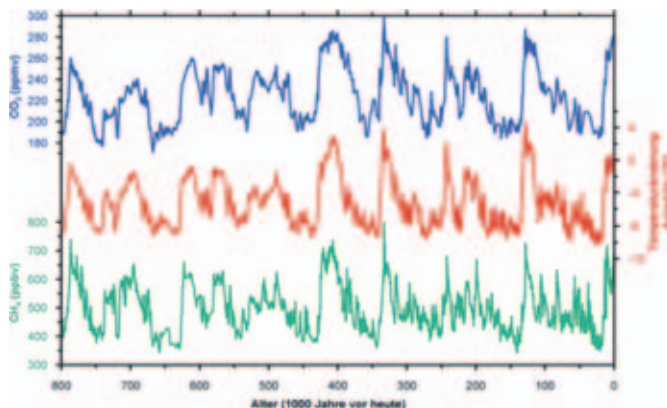
Klimaforschung auf dem Eiszeitkontinent

Eine der brennenden Fragen der Menschheit ist die Frage nach einer Klimaänderung. Will man die heutige Klimaänderung verstehen, ist es unerlässlich, auch auf Klimaänderungen in der geologischen Vergangenheit zu schauen. Damit wird Paläoklimatologie ein Bindeglied zwischen Geo- und Klimaforschung. Drastische Klimaänderungen in der Erdgeschichte waren die Wechsel zwischen Eis- und Warmzeiten oder die Wechsel zwischen Glazial- und Interglazialzeiten. Geologen, Astronomen und Paläoklimatologen betrachten die Klimaentwicklung über 500 Mio. Jahre hinweg. Klimatologen stützen ihre Modelle auf relativ kurze Messreihen. Nach Angabe des Deutschen Wetterdienstes werden Großwetterlagen seit 1881 erfasst, synoptisch sortierte globale Beobachtungsdaten erst seit 1979. Nur phänologische Daten reichen bis zum 16. Jahrhundert zurück (imkhp7.physik.uni-karlsruhe.de/ZUDIS/DOCS/141-01.html).

Schwarzbach (1993) erwähnte weit mehr als 50 Hypothesen, die alle die Wechsel zwischen Glazial- und Interglazialzeiten erklären wollen – oftmals mit gegensätzlichen Argumenten. Eins ist klar. Klimahypothesen müssen Schwankungen in sehr unterschiedlichen Zeitintervallen und Größenordnungen berücksichtigen, also lang-, mittel- und kurzfristige Schwankungen zwischen 10 bis 1.000 und 10 bis 100 Mio. Jahren. Sie müssen außerdem ein breites Spektrum von Faktoren berücksichtigen, die alle einen Einfluss in der einen oder anderen Richtung auf das Klima haben können, so z.B.

- Plattentektonik, d.h. kontinentale Drift, Verteilung von Kontinenten und Ozeanen, Reliefänderungen (z.B. Gebirgsbildung), relative Polverschiebung (dadurch Veränderung der Breitenlage),

Abb. 1: Die Analyse von Luft-einschlüssen im Eis erlaubt die Bestimmung von Kohlendioxid (CO_2), Temperatur und Methan (CH_4). Die Daten stammen von Eiskernen der Bohrungen Station Vostok, Taylor Dome und EPICA Dome C, die hier bis 800.000 Jahre zurückreichen (Quelle: Univ. Bern, LGGE).



- Erdbahnparameter, d.h. Neigung der Erdochse, Exzentrizität der Erdbahn etc.
- extraterrestrische Faktoren, z.B. Änderung der Solarkonstante, Sonnenaktivität etc.
- atmosphärische Parameter, d.h. Zusammensetzung der Lufthülle der Erde, Anteil vor allem an Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und anderen Treibhausgasen.

Plattentektonische Prozesse führen lediglich zu langfristigen Schwankungen. Aber bereits die extraterrestrischen Parameter ändern sich kurzfristig, denn die Sonnenaktivität schwankt deutlich. Die Erdbahnparameter sind ebenfalls keine Konstanten. Erdochse und Erdrotation können sich abrupt ändern. Wenn schon, wie NASA-Experten berichten, die Erdochse durch das starke Chile-Beben vom 27.2.2010 (Magnitude 8,8) um 8 cm verschoben wurde, dann bewirken Meteoriteneinschläge u.U. eine gravierende Änderung der Neigung der Erdochse und der Rotationsgeschwindigkeit. Und sie ändern schlagartig die Luftchemie. Die atmosphärischen Parameter werden aber ebenso durch Vulkanismus kurzfristig beeinflusst – und auch durch den Menschen. Der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre steigt derzeit. Und dadurch auch die globale Temperatur?

Hier entbrannte eine hitzige Debatte zwischen Klimamodellierern und Mitgliedern des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate

Change, IPCC) und den als „Klimaleugner“ bezeichneten Kritikern, die jedoch nicht generell eine Klimaänderung leugnen. Sie weisen lediglich auf die Unsicherheit der jetzigen Modelle und die Komplexität der Klima beeinflussenden Faktoren hin und akzeptieren nicht zwangsläufig die Hypothese, die die derzeitige Erwärmung als „anthropogenic global warming“ versteht. Hier können Forschungsergebnisse aus der Antarktis hilfreich sein.

Antarktika, unser „Eiszeitkontinent“, war nicht zu allen Zeiten vereist, wie Fossilien aus dem Mesozoikum belegen, als der Kontinent noch eine äquatornähere Position innehatte. Seit rund 30 Mio. Jahren ist der Kontinent jedoch praktisch in seiner heutigen Südpol-Lage. Diese Lage sowie die Öffnung der Drake-Passage zwischen der Antarktischen Halbinsel und Südamerika, wodurch sich der Antarktische Zirkumpolarstrom ausbilden konnte, führten zum Beginn der antarktischen Vereisung. Warmzeiten bzw. Zwischeneiszeiten, die die Nordhemisphäre prägten, haben seitdem keine vollständig eisfreie Antarktis mehr hervorgebracht. Aber wie wird sich der weiße Kontinent in Zeiten eines „global warming“ verhalten? Werden einst die Gletscher, die ihre Eismassen heute noch als Gletscherzungen ins Meer schieben bzw. Schelfeistafeln nähren, in grünen Gürteln einer üppigen Küstenvegetation enden, ähnlich wie

der Tasman-Gletscher in Neuseeland? Wird ein Teil der Eismassen schmelzen und dadurch den Meeresspiegel ansteigen lassen? Werden dann viele Küstenregionen der Erde „Land unter“ melden, einschließlich vieler Megacities? Hier stellt sich die entscheidende Frage, in welcher Weise die Polarregionen der Erde unser Klima oder sogar die Verteilung von Land und Meer beeinflussen. Sie sind als Schlüsselgebiete für Klimavariationen erkannt worden. Vor allem das Eis der Antarktis erweist sich als ein unschätzbare Klimaarchiv. Es erlaubt paläoklimatische Aussagen und Messungen an Eiskernen, z.B. aus der 3270,2 m tiefen EPICA-Bohrung, die an der Basis über 900.000 Jahre altes Eis antraf. Analysen an feinsten Luftfeinschlüssen im Eis zeigen eine deutliche Korrelation zwischen CO_2 - und CH_4 -Gehalt der früheren Atmosphäre und der Temperatur (Abb. 1).

Es besteht kein Zweifel, dass die Kurven hervorragend korrelieren. Aber es gibt bisher keinen Konsens darüber, ob zuerst die Temperatur und dann CO_2 und CH_4 anstiegen, oder erst CO_2 und CH_4 und dadurch die Temperatur. Auch als Folge einer Erwärmung wird es zu einem Anstieg der Treibhausgase kommen, werden doch wärmere Ozeane weniger Kohlendioxid speichern können und durch das Verschwinden von Permafrost, so ist zu befürchten, werden riesige Mengen Gas hydrate freigesetzt.

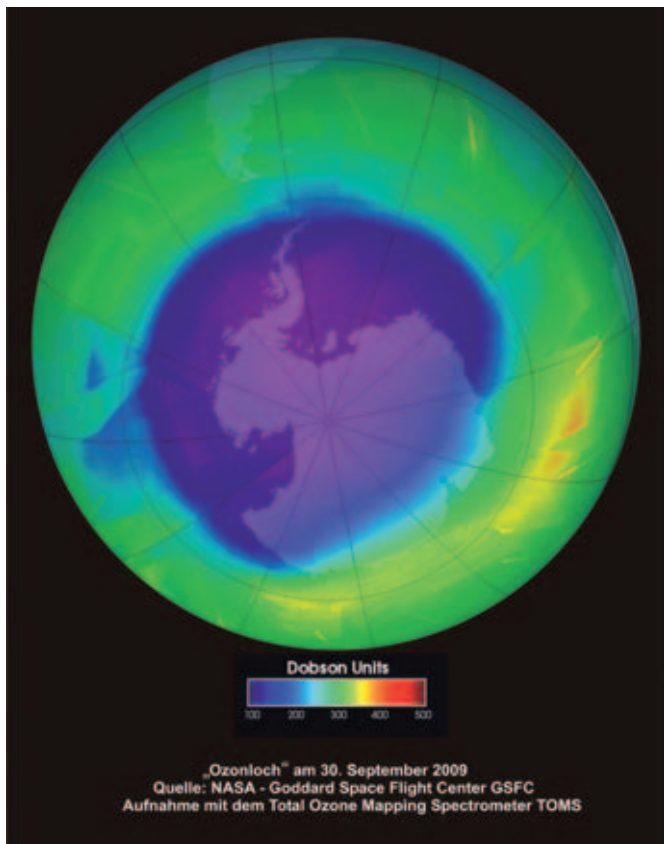
Die zeitliche Auflösung in Abschnitte von ungefähr 380 Jahren erlaubt erstmals einen Einblick in natürliche Klimaschwankungen, die von mehreren Jahrhunderten bis hin zu ganzen Eiszeitzyklen von 100.000 Jahren dauerten. Dabei wurden die Variationen, die durch die Schiefe der Erdachse und der Geschwindigkeitsänderung der Erdrotation verursacht werden, in den letzten 400.000 Jahren deutlich stärker. Die Daten liefern neue Eckwerte in der Diskussion über die Bedeutung des gegenwärtigen Anstieges der Treibhausgase durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und Änderung der Landnutzung. Die heutigen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre sind über 28 % höher, CH_4 ist heute um über 124 % höher als je zuvor in den letzten 800.000 Jahren (Lüthi et al. 2008).

Es gibt weiteren Forschungsbedarf. So werden auch Korrelationen zwischen Sonnenaktivität, kosmischer Strahlung und Erwärmungs- bzw. Abkühlungsphasen postuliert. Der Einfluss kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung der Erde wird wie folgt erklärt. Bei Sonnenflecken-Aktivität ist das Magnetfeld der Sonne stärker. Dadurch werden kosmische Strahlen besser von der Erde fern gehalten und die Luft wird weniger ionisiert. Ionisierte Teilchen sind aber neben Staub die notwendigen Kondensationskerne für eine Wolkenbildung. Weniger Wolken führen zu mehr Einstrahlung von der Sonne, also zu einem Temperaturanstieg. Bei weniger Sonnenflecken gibt es mehr Wolken, die Albedo ist höher und die Temperatur sinkt. Das Dalton-Minimum und vor allem das Maunder-Minimum (die „kleine Eiszeit“ 1645–1715) scheinen diese Hypothese zu bestätigen, da dies ebenfalls Zeiten mit nur geringen bzw. fehlenden Sonnenflecken waren. Zwischen 2006 und 2010 wurde ebenfalls eine extrem geringe Sonnenflecken-Aktivität registriert. Steht der strenge Winter 2009/2010 damit im Zusammenhang? Es ist klar, nur längerfristige Trends, nicht einzelne Ereignisse sind aussagekräftig. Aber die rezente globale Erwärmung muss in Kenntnis der in jüngster Zeit erforschten komplexeren Beziehungen weiter untersucht werden, denn exogene Faktoren spielen offensichtlich eine weitaus größere Rolle als von den Befürwortern der AGW-Hypothese bisher akzeptiert wird.

„Ozonloch“ am Südpol

Ozonmessungen wurden in den vergangenen Jahrzehnten regelmäßig durchgeführt, z.B. während der DDR-Antarktisexpeditionen auf der Georg-Forster-Station oder von den Briten auf der Station Halley. Seit den frühen 1970er Jahren hatten die in der Luftsäule über der Station Halley gemessenen Werte zum Ende des antarktischen Winters regelmäßig einen Ozonrückgang angezeigt. Wissenschaftler sind meist sehr vorsichtig und zögern, ungewöhnliche Ergebnisse sofort zu veröffentlichen. So auch die Briten, die eher an Fehler der Messinstrumente dachten, zumal es nach Computermodellen

Abb. 2: Das Gebiet starker Ozonausdünnung (in Blau) überdeckt praktisch die gesamte Antarktis (Quelle: NASA/GSFC).



einen so starken Rückgang gar nicht geben konnte. Erst als in den frühen 1980er Jahren die Ozongehalte im Oktober regelmäßig um bis zu 40 % reduziert waren, entschloss man sich, an die Öffentlichkeit zu gehen – rund 10 Jahre nach den ersten Registrierungen des Ozonabfalls. Zwar berichteten bereits 1984 die Japaner von niedrigen Ozongehalten, die von der Station Syowa aus gemessen worden waren. Die Ergebnisse der Briten wurden aber erst 1985 publiziert (Farman et al. 1985).

Die Fachwelt reagierte wie erwartet mit Skepsis. Denn mit den um 1980 herum bekannten Fakten der Luftchemie war ein Ozonloch nicht zu erklären. Außerdem hatte der NASA-Satellit Nimbus 7 nichts dergleichen registriert, obwohl er ent-

sprechend sensible Instrumente zur Messung des Ozongehaltes an Bord hatte und alle 90 Minuten die Antarktis in Polnähe überflog. Computer und Satelliten sind aber nur so gut wie ihre Programmierung. Eine nachträgliche Überprüfung der Daten am Goddard Space Flight Center ergab, dass Nimbus 7 programmiert war, alle „unrealistischen“ Werte unberücksichtigt zu lassen. Also wurde das starke Abfallen der Ozonwerte einfach herausgefiltert. Bei einer erneuten Bearbeitung der alten Daten, bei der alle Messwerte berücksichtigt wurden, konnte der Ozonabbau auch durch die Satellitenbeobachtungen nachträglich bestätigt werden. Seit Jahren waren also diese Schwankungen von Satelliten und Bodenstationen registriert worden,

ohne dass man die richtigen Schlussfolgerungen aus den Daten gezogen hätte. Das Ozonloch hatte sich über Jahre hinweg vergrößert und überdeckt inzwischen den antarktischen Kontinent. Abb. 2 zeigt das „Ozonloch“, also die Zone geringster Ozonkonzentration, vom 30. September 2009, also dem letzten Südwinter.

Dies ist ein Lehrbuchbeispiel, wie schwierig es für Wissenschaftler sein kann, ihre eigenen Modelle infrage zu stellen. Aber es zeigte auch, dass Antarktisforschung keine Forschung im Elfenbeinturm ist, sondern von globaler Bedeutung sein kann. Schließlich wuchs speziell unter den Polarforschern die Erkenntnis, dass die Wissenschaft einerseits Spezialisten benötigt, dass andererseits die Interaktionen zwischen Atmosphäre, Kryo-, Bio- und Geosphäre gerade in den Polargebieten besonders deutlich werden und daher fachübergreifende, d.h. interdisziplinäre Forschung erfordern.

Warum laufen diese Prozesse aber nicht weltweit in der Stratosphäre ab? Wie kann man erklären, dass gerade über den Polen, besonders über der Antarktis, diese Ozonausdünnung auftritt und zwar speziell am Ende des Südwinters bzw. im Südfrühjahr? Folgende Prozesse, die auf die Polargebiete beschränkt und in der Antarktis besonders ausgeprägt sind, begünstigen den Ozonabbau:

1. In der Kälte, bei einer Temperatur von unter $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ kondensieren Gase, u.a. Wasserdampf und Stickstoff bzw. Salpetersäure und z.T. auch Schwefelsäuretröpfchen aus Aerosolen und bilden Kristalle. An den Oberflächen der Kristalle laufen chemische Reaktionen ab. So reagieren die beiden sog. Reservoirgase des Chlors, nämlich Chlornitrat (ClONO_2) und Salzsäure (HCl) miteinander ($\text{ClONO}_2 + \text{HCl} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{Cl}_2$). Das Chlornitrat wird nach dem Polarwinter aufgespalten, und molekulares Chlor und Salpetersäure werden freigesetzt. Mit der Rückkehr der Sonne wird durch die Einstrahlung das molekulare Chlor in Chloratome zerlegt. Danach beginnt dann der oben beschriebene katalytische photochemische Prozess der Ozonzerstörung. Ein einziges Chloratom kann rund 100.000 Ozon-

moleküle zerstören, bevor es gebunden als Chlornitrat oder als Salzsäure durch Luftbewegungen aus der Stratosphäre in die Troposphäre gelangt und dann durch Regen oder Schnee „ausgewaschen“ wird.

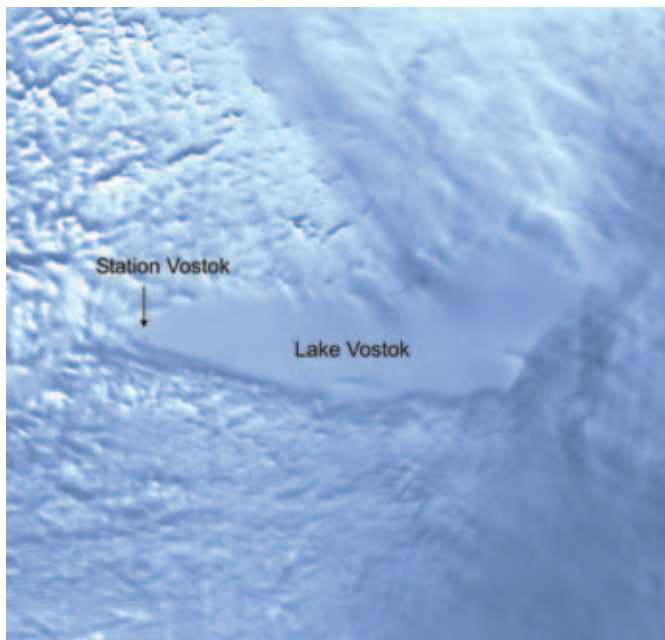
2. Mit Beginn des Südwinters und der Polarnacht baut sich ein im Uhrzeigersinn drehender Wirbel in der Stratosphäre auf. Der Tiefdruckwirbel ist während der Wintermonate stabil und lässt die Luftmassen um den Pol kreisen. Dieser Polarwirbel (Polarer Vortex) ist ein Ring starker Winde, der rund 100 km breit ist und in einer Höhe von rund 20 Kilometern etwa der Küstenlinie der Antarktis folgt. Er verhindert ein Einströmen wärmerer Luft aus den gemäßigten Breiten. Dadurch können die Luftmassen über dem antarktischen Kontinent diese extrem tiefen Temperaturen erreichen, die den Ozonabbau begünstigen. Dieser Wirbel verhindert damit aber auch einen Austausch zwischen der ozonreicheren Luft außerhalb des Wirbels und der ozonarmen Luft im Inneren.

Mit der Erwärmung im Sommer beginnt wieder ein besserer Ozonaustausch. Ozon wird aus den mittleren Breiten in die Antarktis bzw. Arktis transportiert, um am Ende des Winters dort zerstört zu werden. Die Polarregionen wirken dadurch quasi als Pumpen. Der Ozonabbau über den gemäßigten Breiten dürfte daher eher dieser Ausdünnung zuzurechnen sein und weniger durch akut ablaufende chemische Prozesse hervorgerufen werden, da keine vergleichbar tiefen Temperaturen erreicht werden (siehe auch Roland 2009).

Leben in Seen unter dem Eis?

Ähnlich wie bei der Entdeckung des Ozonloches brauchte es viele Jahre, bis endlich die Existenz eines riesigen Sees bei der russischen Station Vostok erkannt wurde. Bereits 1957–1964 war das Gebiet um die Station Vostok und damit auch der Bereich des Lake Vostok im Rahmen der Sowjetischen Antarktis-Expeditionen (SAE) geophysikalisch vermessen worden. Die Existenz eines subglazialen Sees wurde aus den

Abb. 3: Lake Vostok, der 26 mal so groß ist wie der Bodensee, gilt als die bedeutendste geographische Entdeckung am Ende des letzten Jahrtausends (Quelle: RADARSAT, NASA/GSFC).



Daten nicht abgeleitet. In den 1970er Jahren wurde das Gebiet von Briten und Amerikanern mit dem Eisdickenradar befliegen. Dabei erkannte man bereits Reflektionen durch Wasser (Radarsignale werden durch Wasser hervorragend reflektiert) und vermutete einen großen subglazialen See, dessen Zentrum etwa 190 km nordnordwestlich der russischen Station Vostok lag. Aber noch immer wurde die Bedeutung eines solchen Sees für die Wissenschaft nicht erkannt. Es war dann eine Sensation (dank einer besseren Vermarktung von wissenschaftlichen Forschungsergebnissen?), als man im Jahr 1993 mit Hilfe der satellitengestützten Altimetrie (Höhenmessung) von ERS-1 weitere Beweise gefunden hatte und man nun endlich von einem riesigen Süßwassersee unter rd. 4.100 m dickem Eis sprach. Nach der am Rande des Sees gelegenen russischen Station wurde er Lake Vostok (Wostoksee) genannt (Abb. 3). Die Entdeckung war der Wissenschaftszeitschrift Nature im Juni 1996 ein Titelblatt wert mit dem Text Giant lake beneath the Antarctic ice. Durch eine Re-Inter-

pretation der alten Daten und einen Vergleich der Seismikdaten (seismische Reflexionen vom Seeboden) mit den Eisdickendaten (Radarreflexion von der Eisunterkante) konnte der See eindeutig bestätigt werden. Abschätzungen der Tiefe des Sees und seiner Form, also die erste bathymetrische Darstellung, erfolgten nach Auswertung von Schweremessungen, die während einer aerogeophysikalischen Befliegung des Lake-Vostok-Gebietes im Südsommer 2000/2001 gewonnen werden konnten. Inzwischen ist die Existenz von Lake Vostok und vieler anderer subglazialer Seen unumstritten. Lake Vostok gilt als größte geographische Entdeckung am Ende des letzten Jahrtausends, ermöglicht durch eine Kombination verschiedener geophysikalischer Messverfahren, mit denen man quasi durch das Eis „hindurchgucken“ kann.

Was ist bisher bekannt? Lake Vostok liegt zwischen 78,3° S und 78,5° S sowie 102° E und 106° E, ist etwa 230 km lang und maximal 50 km breit. Er nimmt eine Fläche von 14.000 km² ein und ist damit über 26 mal größer als der Bodensee

(536 km²) bzw. hat etwa die Größe des Lake Ontario in Kanada. Lake Vostok ist 400 bis 1.000 m tief (zum Vergleich: die maximale Tiefe des Bodensees beträgt 254 m). Die Eisdicke über dem See schwankt zwischen 3.700 und 4.200 m. Der Auflastdruck des Eises entspricht ca. 350 bar. Durch diesen Druck, sowie durch geothermale Aufheizung bleibt das Süßwasser flüssig. Vulkanische Aktivitäten sind nach den tektonischen Modellen eher unwahrscheinlich. Die Fließgeschwindigkeit des Eises beträgt nur 3 m pro Jahr. Die Mächtigkeit der Seesedimente wird auf 100–300 m geschätzt, wobei es sich vorwiegend um glazigene Sedimente handeln dürfte.

Nachdem die Existenz des Sees erkannt war, kam der Wunsch auf, Wasser- und Sedimentproben zu gewinnen. Russland begann mit Bohrungen. 2010 erklärte Valery Lukin, der Leiter der Russischen Antarktis-Expedition, dass man nur noch 100 m bis zur Eis/Wasser-Grenze habe und der See bis spätestens 2011 erreicht werden soll.

Es gab und gibt Wissenschaftler, die vor einer Kontamination des Sees durch die Bohrung warnen. In der Tat ist zu verhindern, dass einerseits Schwermetalle oder andere anorganische Einträge ins Seewasser gelangen, zum anderen aber vor allem auch organische z.B. Viren, Bakterien, Flagellaten (Geißeltierchen) oder Protisten (Algen, Schleimpilze, einzellige Protozoen) eingeschleppt werden, die eine Veränderung der Biota auslösen und zu einer Verfälschung der mikrobiologischen Forschungsergebnisse führen könnten.

In fast allen Schichten des Eises über dem See fanden sich Pollen, Pilze und einzellige Algen, Cyanobakterien und Bakterien oder Reste von Schwämmen und Federn. Exotische Mikroben kamen z.T. zu Tage, die man nicht direkt zuordnen konnte. Alle diese Organismen wurden vermutlich mit dem Wind herangetragen und vor Jahrtausenden im Eis eingeschlossen. Sie wurden umso seltener, je tiefer die Bohrung vorgedrungen war. Man fand aber selbst in dem 240.000 Jahre alten Eis noch Sporen, die sich nach dem Auftauen vermehrten. Das älteste Eis, das sich aus Niederschlägen gebildet hat, ist

420.000 Jahre alt. Über 200 m an der Basis des Eisschildes bestehen aus Seewasser (von 3.539 m bis zur Eis/Wasser-Grenze bei ca. 3.760 m), das an der Eisunterseite angefroren ist. Auch hier konnten noch lebensfähige Mikroorganismen, z.B. Bakterien, isoliert werden. Es gibt bereits Stimmen von Wissenschaftlern, die eine Freisetzung und Verbreitung möglicher im Eis oder Seesediment lebender pathogener Viren als Bedrohung für die Menschheit darstellen.

Gesteinspartikel, die im Eis eingeschlossen sind, haben Alter bis zu 1,5 Mrd. Jahren. Sie entstammen dem Basement, also dem geologischen Grundgebirge und sind während der Erosionsprozesse im Eis eingeschlossen worden. Es werden allerdings auch Hinweise auf Gips, Steinsalz, Magnesium- und Kalziumsulfat gefunden, die für ein Evaporitvorkommen talaufwärts des Sees sprechen, das vor der Vereisung an der Oberfläche lag. Und man fand Sedimentschlieren im Eis, das an der Basis angefroren ist und das vom Seeboden stammen könnte. In diesen Sedimenten wurden thermophile Bakterien angetroffen, Bakterien, die Temperaturen von 50–60 °C bevorzugen. Könnte dies ein Hinweis auf heiße Quellen am Seeboden sein?

Der Ionengehalt des an der Unterseite des Eispanzers neu gebildeten, angewachsenen Eises ist 5–50 mal geringer als in normalem Gletschereis. Das bedeutet, dass das Seewasser eine Salinität von 0,1 ‰ aufweist. Modellrechnungen über die Bildung und Stabilität von Gashydraten lassen darauf schließen, dass das unter Druck stehende Seewasser mit Stickstoff und Sauerstoff übersättigt ist. Überdruck und hohe Gehalte dieser Gase könnten sich nachteilig auf das Vorkommen von Organismen im See auswirken. Dennoch werden im Seeeis, das an der Basis des Inlandeispanszers angefroren ist, Einzeller gefunden.

Ist die Tatsache, dass subglaziale Seen existieren, bereits interessant, so ergeben sich aus diesem Umstand natürlich zahlreiche neue Forschungsansätze: Wie alt ist das Seewasser? Lake Vostok ist nach neuen Vermessungen in zwei Becken gegliedert. Wird man in beiden

Becken vielleicht sogar auf eine unterschiedliche Wasserchemie treffen? Immerhin schätzt man, dass das Wasser 55.000 bis 110.000 Jahre benötigt, um sich in den beiden Becken komplett auszutauschen, wird doch die Zirkulation nur durch schwache Dichteunterschiede im Wasser angetrieben, die durch Gefrier- bzw. Schmelzprozesse an der Eisunterkante ausgelöst werden, d.h. durch eine thermohaline Zirkulation.

Neben der Frage, wie alt das Seewasser ist, wird von Geologen die Frage gestellt, wie alt das Seebecken ist, wann es angelegt wurde und welche geologischen Prozesse zu seiner Bildung geführt haben. Nach der vorherrschenden Meinung der Glazialgeologen ist zwar eine permanente Vereisung der Antarktis ab ca. 35 Mio. Jahren anzusetzen. Aber auch danach haben wohl noch signifikante Schwankungen der Eisbedeckung stattgefunden. Aus den Seesedimenten von Lake Vostok könnte man sicherlich auch zu diesem Fragenkomplex weitere Antworten bekommen – und ganz generell zu der evolutionären Geschichte in einem subglazialen Milieu. Last but not least und eine der zentralen Fragen überhaupt: Wird man Lebensformen antreffen, die seit vielen hunderttausend Jahren vom Sonnenlicht und der Atmosphäre abgeschlossen waren und für die kein Austausch mit dem Rest der Biosphäre möglich war? Man vermutet, dass Lake Vostok seit mindestens einer Million Jahre durch den Eispanzer von der Umwelt abgeschlossen ist. Existiert hier also ein Refugium für noch unbekannte Organismen? Wie groß ist die Diversität der Lebensformen, wie hoch sind ihre Wachstums- und Metabolismusraten, wie funktioniert also ihr Stoffwechsel?

Ist bereits die Erforschung der Ökosystem-Entwicklung in einem derartig isolierten Umfeld von höchstem wissenschaftlichen Interesse, so hat tatsächlich Lake Vostok und seine kontaminationsfreie Erforschung zusätzlich an Bedeutung für die extraterrestrische Biologie gewonnen, speziell für die Erforschung des eisbedeckten Jupitermondes Europa, unter dessen Eispanzer sich wahrscheinlich ein Ozean erstreckt. Wenn Organismen sich unter dem bis

über 4.000 m dicken Eispanzer unter hohem Druck, in Dunkelheit und einem extrem nährstoffarmen Wasser, d.h. unter den auf unserem Planeten krassesten, unwirtlichsten Lebensbedingungen, die nirgendwo sonst auf unserem Planeten studiert werden können, über viele hunderttausend Jahre erhalten oder weiter entwickeln konnten, dann besteht auch eine gewisse Chance, im Eis vom Mars oder unter dem Eis auf Europa Lebensformen zu entdecken. So die ersten Überlegungen. Inzwischen kam es zu einer Vielzahl weiterer Entdeckungen. Man kann davon ausgehen, dass zu den bis 2008 entdeckten über 160 Seen noch weitere hinzu kommen werden. Viele Seen sind nur wenige Quadratkilometer groß. Es wurden aber bereits einige weitere große Seen lokalisiert, auch wenn sie nicht die Größe von Lake Vostok erreichen. Lake Concordia ist mit mindestens 40×20 km relativ klein, zeigt aber durchaus Ähnlichkeiten mit Lake Vostok. Inzwischen werden die Modelle etwas revidiert und es gibt durchaus auch die Möglichkeit, dass die Seen dynamische Systeme darstellen mit Abfluss des Seewassers zum Meer und Neubildung von Schmelzwasser. Es gibt sogar erste Vermutungen, dass einige Seen durch ein Flussnetz miteinander verbunden sein könnten.

Rohstoffe vom 7. Kontinent?

Eine der frühen Fragen bei der Erforschung unbekannter Regionen gilt den möglichen Rohstoffen. In der Antarktis war es sogar im 19. Jahrhundert zunächst der Wal- und Robbenfang, der die Entdeckung der Landmasse im Süden förderte. Im 20. Jahrhundert glaubte man, mit dem Krill eine „Eiweißreserve der Menschheit“ erschließen zu können. Auch die Erwartungen bei den mineralischen Rohstoffen waren zunächst hoch. Folgende Aspekte führten wohl zu dieser Einschätzung:

- Der antarktische Kontinent ist bisher „unverritz“, d.h. noch keine einzige Lagerstätte ist abgebaut worden.
- Vergleiche der Größe der Antarktis mit der Lagerstätdichte und Größe anderer Kontinente lassen rechnerisch eine Zahl von über



◀ **Abb. 4: Karte der Mineralvorkommen Antarktikas. Es ist zu betonen, dass es sich nicht um Lagerstätten oder gar bauwürdige Lagerstätten handelt. Lediglich Kohle und Eisenerz sind bisher in Lagerstättengröße bekannt, die als Massenrohstoffe nicht bauwürdig sind.**

900 Lagerstätten erwarten. Dem muss entgegen gehalten werden, dass weniger als 2 % der Antarktis schnee- und eisfrei sind, dass die mittlere Eismächtigkeit bei rd. 2.160 m liegt und die bisher gemessene maximale Mächtigkeit 4.776 m beträgt. Es ist offensichtlich, dass durch diesen mächtigen Eispanzer hindurch keine Lagerstätten aufgesucht oder gar abgebaut werden können und damit die Zahl der rein rechnerisch zu erwartenden Lagerstätten drastisch reduziert werden muss.

- Die zentrale Lage Antarktikas während seiner Zugehörigkeit zum Gondwana-Superkontinent zu klären, seine Beziehung zu den benachbarten heutigen Südkontinenten zu ermitteln war eines der frühen Ziele der Geoforschung, konnte man doch dann Lagerstättenbezirke der Südkontinente u.U. auf den antarktischen Kontinent verfolgen.

Aber ist die Antarktis überhaupt das *Dorado*, oder die „Schatzkammer der Menschheit“ als die sie immer wieder apostrophiert wurde? Bekannt sind Vorkommen von Eisenerz und Kohle. Es handelt sich aber nicht um „bauwürdige“ Lagerstätten, denn diese Massenrohstoffe sind für einen Abbau völlig uninteressant. Weiterhin gibt es auf der Antarktischen Halbinsel Mineralisationen von Molybdän, Gold und Silber, die zwar wirtschaftlich nicht interessant, dafür aber von wissenschaftlichem Interesse sind, denn die antarktische Halbinsel ist quasi eine Fortsetzung der südamerikanischen Anden, wo diese Metalle in z.T. großen Lagerstätten abgebaut werden. Das Dufek-Massiv in den Pensacola Mountains ist eine „geschichtete Intrusion“, ähnlich dem Bushveld-Massiv Südafrikas, kann also als „höffig“ für Nickel, Kupfer, Platin und andere Rohstoffe betrachtet werden, die typischerweise an diese Intrusionskörper gebunden sind (Abb. 4). Da die Basis dieser Intrusion aber nicht aufgeschlossen ist – und

vor allem hier hätten sich die ökonomisch interessanten Minerale angereichert – kann über das Rohstoffpotenzial dieses Vorkommens derzeit noch nichts ausgesagt werden (Roland 2006, 2009).

Mit rd. 11,9 Mio km² ist die Antarktis zwar nur der fünftgrößte Kontinent, aber immerhin noch größer als Europa oder Australien. Sie weist eine Vielzahl von Superlativen auf, die aber allesamt eine wirtschaftliche Rohstoffgewinnung erschweren. Die Antarktis ist der kälteste, stürmischste, trockenste, lebensfeindlichste, sowie der höchste Kontinent, der aber zugleich den tiefsten Schelf aufweist. Sie ist der abgelegenste und zugleich unzugänglichste und der am wenigsten geologisch bekannte Kontinent, der zudem den besten internationalen Umweltschutz aufweist. Es existieren territoriale Besitzansprüche der so genannten Anspruchsstaaten. Diese Ansprüche werden aber von den Nichtanspruchsstaaten, zu denen neben Deutschland u.a. auch die USA und Russland gehören, negiert. Nach dem Antarktisvertrag von 1958 hat keine Seite ihre Rechtsposition aufgegeben. Dennoch ist gerade der Antarktisvertrag ein exzellentes Beispiel für eine gute internationale Kooperation. Laut Antarktisvertrag ist der Kontinent der friedlichen Nutzung und der Wissenschaft vorbehalten. Nach dem Umweltschutzprotokoll zum Antarktisvertrag von 1991 gilt ein Bergbauverbot (Art. 7), das besagt, dass jegliche Aktivitäten mit Bezug zu mineralischen Rohstoffen, die keine wissenschaftliche Forschung darstellen, verboten sind. Der Vertrag hat eine Laufzeit von 50 Jahren (nach Inkrafttreten 1998) und kann erst danach mit 3/4-Mehrheit neu verhandelt werden.

Man muss kein Prophet sein, um einen Rohstoffabbau in der Zukunft in der Antarktis zu prognostizieren. Der Rohstoffbedarf einer drastisch steigenden Weltbevölkerung wird dies erforderlich machen. Immerhin stieg sie von 1950–2000

von 2,5 auf 6,1 Mrd. 2050 soll sie bei 9,15 Mrd. liegen. Das heißt, dass sich innerhalb von 100 Jahren die Zahl mehr als verdreifacht hat. Der Rohstoffbedarf wird wachsen und damit wird auch die Antarktis unweigerlich wieder ins Visier rohstoffhungriger Nationen rücken. Aber derzeit ist es noch kein Thema, das uns auf den Nägeln brennt. Noch sind die zuvor behandelten Themen weitaus wichtiger.

Literatur

Farman, J. C., Gardiner, B. G. & Shanklin, J. D. (1985): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. - *Nature*, **315**, 207–210.

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. & Stocker, T.F. (2008): High-resolution carbon dioxide

concentration record 650,000– 800,000 years before present. - *Nature* **453**, 379–382.

Roland, N.W. (2006). Bodenschätze und wirtschaftliche Bedeutung der Polarregionen. - In: Lozán, J. L., Grassl, H., Hubberten, H.-W., Hupfer, P., Karbe, L. & Piepenburg, D. (Hrsg.): Warnsignale aus den Polarregionen, 54–61, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg.

Roland, N. W. (2009): Antarktis – Forschung im ewigen Eis. - 334 S., Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag) .

Schwarzbach, M. (1993): Das Klima der Vorzeit – Eine Einführung in die Paläoklimatologie. - 5. Aufl., 380 S., Stuttgart (Enke).

* Dr. Norbert W. Roland, Heideweg 5
30938 Burgwedel
nw.roland@arcor.de