

Temperaturgradienten in der Antarktis

Von Feliks Burdecki *

Wetter Bureau, Pretoria, Republik von Südafrika

Zusammenfassung: Zur Bestimmung meridionaler und vertikaler Temperaturgradienten in antarktischen Gebieten sind zwei Methoden in Anwendung gebracht worden: 1) Meridionale Extrapolation der Temperaturen von Breitengrad zu Breitengrad. 2) Vertikale Interpolation der geothermischen Struktur des antarktischen Eismantels.

Die beachtlichen Unterschiede in den Resultaten beider Methoden können zu Schlußfolgerungen über Klimaänderungen in der Antarktis führen.

Abstract: For the determination of temperature gradients and vertical temperature lapse rates in antarctic regions two methods have been applied: 1) A meridional extrapolation of temperatures, proceeding from latitude to latitude. 2) A vertical interpolation of the geothermal structure of the Antarctic ice-sheet.

The conspicuous differences of the results of both methods may lead to conclusions regarding climatic changes in Antarctica.

Das Problem der Temperatur-Gradienten in der Antarktis sollte im Zusammenhang mit der Verteilung der Temperaturen über die ganze südliche Hemisphäre besprochen werden. Das bedeutet, daß wir verschiedenartigste Gegebenheiten der Luftzirkulation, ozeanischer Strömungen und auch geophysikalischer und topographischer Elemente der gewaltigen Eismasse des Antarktischen Kontinentes zu berücksichtigen haben. In einem kurzen Referat die Vielseitigkeit der Problematik zu erschöpfen, ist natürlich unmöglich. Wir wollen hier die Frage untersuchen, inwiefern die Existenz des Eismantels die thermische Struktur der südpolaren Gebiete beeinflußt.

Demzufolge ergibt sich eine Zweiteilung unserer Untersuchung: *Erstens* können wir eine meridionale Extrapolation der Temperaturen von Breitengrad zu Breitengrad versuchen; *zweitens* können wir, von der Eisoberfläche ausgehend, durch eine vertikale Interpolation die Isothermie des antarktischen Eisblocks und seines Untergrundes bestimmen.

Die meridionale Extrapolation der Temperatur-Gradienten

Wir können die Existenz der enormen südpolaren Eismassen vorläufig vernachlässigen, und eine meridionale Extrapolation der Temperatur-Gradienten in Meereshöhe versuchen. Allerdings ist dabei zu bemerken,

daß eine völlige Ausklammerung des südlichen Eisriesen nicht möglich ist, da polare Einflüsse bis in die Tropen zu verzeichnen sind.

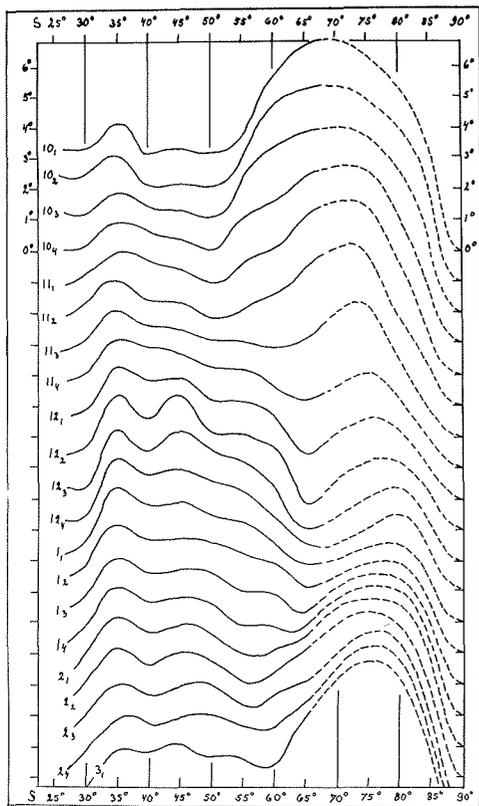
Bei einer solchen Studie folgen wir dem Beispiel eminenten Naturforscher, von A. von Humboldt beginnend über A. W. Dove, W. Meinardus, A. Woeikof bis J. Hann und R. Süring, um nur einige zu erwähnen. Der Verfasser hat unlängst eine Untersuchung der Temperatur-Verteilung auf der Oberfläche der Südhemisphäre während der Sommermonate Oktober bis Anfang April des Internationalen Geophysikalischen Jahres durchgeführt und sah sich dabei veranlaßt, gleichfalls diesen Weg zu beschreiten.

Grundlage der Studie waren die vom Südafrikanischen Wetterdienst bearbeiteten „World Weather Maps“ für den südlich von 20° S Breite gelegenen Teil der Südhemisphäre (1). Es wurden für jeden Tag des Sommerhalbjahres die Mitteltemperaturen für 5° Breitenzonen von 20° bis 70° S berechnet. Auch die Temperatur-Angaben für die Südkalotte wurden zu Mittelwerten zusammengefaßt, wobei die Südpolar-Station als für das ganze Gebiet von 84° S repräsentativ angenommen wurde.

Bis zu 70° S bereitete auch die Reduktion der Temperaturen auf Seehöhe keinerlei Schwierigkeiten, insbesondere da ja der größte Teil der Südkalotte südlich von 20° S Breite bis 70° S überwiegend vom Weltmeer bedeckt ist. Auf Einzelheiten braucht hier nicht eingegangen zu werden. Auf meine im „Notos“ zur Zeit erscheinende Arbeit sei hingewiesen. (2)

Um kurzperiodische Temperatur-Schwankungen aus den Berechnungen zu entfernen, wurde ein doppelter Glättungsprozeß durchgeführt. 15tägige sich überschneidende Temperatur-Mittelwerte wurden für jeden Tag und jede 5° geographische Breitenzone berechnet und darauf von diesen Mittelwerten 14tägige Mittel genommen. *Fig. 1* stellt die Kurven der Temperaturgradienten per 5°

* Dr. Feliks Burdecki, Pretoria (Arcadia), Clarendon Court 3, Eastwood Str. 162 SOUTH AFRICA



Figur 1
Kurven der Temperaturgradienten pro 5° geogr. Breite

Tafel 1

Mittlere theoretische, auf Seehöhe reduzierte Temperaturen von 5-Breitengrad-Gürteln von 60° S bis zum Südpol, sowie die entsprechenden vertikalen Temperatur-Gradienten per 100 Meter Höhendifferenz für den Südpol (L90) und gemittelt für die Südhemisphäre, ab 20° S (LSH). Es

geographische Breite als Resultat der Berechnungen und teilweise graphischen Extrapolationen dar. 10₁ bedeutet das 14tägige Mittel für die ersten Tage des Oktober, 10₂ für Mitte Oktober, 10₃ für die letzten 14 Oktober-Tage und 10₄ für 7 letzte Oktober- und 7 erste November-Tage, und so fort. Bis 65° S sind die Kurven gut dokumentiert. Ab 70° S repräsentieren die gestrichelten Linien die Interpolationen bis zum Südpol. Jede folgende Kurve ist um einen Grad nach unten verschoben. Alle Gradientenkurven wurden unter der Annahme extrapoliert, daß am Südpol der Gradient gleich 0 ist, daß also der Südpol, reduziert auf Seehöhe, der kälteste Punkt der Südhemisphäre wäre.

Die entsprechenden Temperatur-Mittelwerte für die einzelnen Breitenzonen auf der Oberfläche der Antarktis wurden auf Grund der Beobachtungen während des Intern. Geophys. Jahres errechnet. Da auch die Höhenlagen bekannt sind, ließen sich die vertikalen Temperaturgradienten im Eismantel leicht deduzieren. Tafel 1 gibt eine Übersicht der auf diese Weise erhaltenen Temperaturwerte in der Antarktis für die Breitenzonen ab 60° S. Selbstverständlich darf man die Angaben nicht zu genau nehmen. Es handelt sich um eine Interpolation

sind 14tägige Mittelwerte für die ersten 14 Tage des Oktober (10₁), für Oktober-Mitte (10₂), für die letzten 14 Tage des Oktober (10₃), für die letzten 7 Oktober- und ersten 7 Novembertage (10₄) usw. Nur für 60° bis 65° S sind Vorzeichen angegeben. Alle anderen Temperaturangaben sind minus C°.

0S	10 ₁	10 ₂	10 ₃	10 ₄	11 ₁	11 ₂	11 ₃	11 ₄	12 ₁	12 ₂	12 ₃	12 ₄
60—65	-6.6	-6.7	-6.3	-5.0	-3.5	-2.0	-1.2	-0.9	-0.7	-0.4	-0.0	+0.3
65—70	13.2	12.9	12.0	10.4	8.5	6.4	4.4	3.0	2.0	1.2	1.0	1.2
70—75	20.0	19.3	18.0	16.1	14.1	11.4	8.4	5.7	4.2	2.8	2.4	2.6
75—80	26.3	25.2	23.7	21.7	19.5	16.2	12.7	8.7	6.8	5.0	4.4	4.6
80—85	31.6	30.2	28.3	25.7	23.1	19.0	15.1	10.9	8.9	7.1	6.7	7.0
85—90	34.9	33.2	30.5	27.4	24.4	20.1	15.9	11.8	9.9	8.2	7.8	8.1
90	35.1	33.4	30.7	27.6	24.6	20.3	16.1	12.0	10.1	8.5	8.0	8.2
L90	0.67	0.61	0.66	0.70	0.68	0.60	0.49	0.51	0.51	0.53	0.60	0.58
LSH	0.49	0.50	0.53	0.53	0.53	0.51	0.43	0.47	0.49	0.55	0.62	0.65
0S	1 ₁	1 ₂	1 ₃	1 ₄	2 ₁	2 ₂	2 ₃	2 ₄	3 ₁	3 ₂	3 ₃	3 ₄
60—65	+0.5	+0.7	+1.0	+1.1	+0.6	-0.0	-0.7	-0.9	-1.0	-1.6	-2.6	-3.2
65—70	1.3	1.4	1.2	1.8	3.0	4.1	4.8	5.4	6.3	8.0	9.4	9.8
70—75	3.3	3.9	4.4	5.5	7.5	8.9	9.8	11.1	12.6	15.1	17.0	17.7
75—80	5.7	6.6	7.9	9.7	12.2	14.1	15.4	17.2	19.4	22.4	24.6	25.5
80—85	8.1	9.2	11.2	13.6	16.5	18.8	20.4	22.6	25.5	29.1	31.6	32.6
85—90	9.4	10.8	13.2	16.1	19.2	21.6	23.3	25.7	29.1	33.0	35.6	36.7
90	9.7	11.0	13.4	16.3	19.4	21.9	23.7	26.1	29.6	33.6	36.3	37.6
L90	0.46	0.41	0.45	0.48	0.53	0.52	0.51	0.59	0.67	0.72	0.78	0.78
LSH	0.59	0.58	0.59	0.56	0.51	0.51	0.57	0.67	0.71	0.70	0.70	0.69

rein theoretischer Natur, die allerdings, wie wir sehen werden, Grundlage sein könnte zu einer Untersuchung der Paläoklimate der Antarktis sowie der energetischen „Anforderungen“ für eine grundlegende Änderung bestehender Klimaverhältnisse.

Hingewiesen sei auf die Rubriken L90 und LSH, die die entsprechenden vertikalen Temperaturgradienten per 100 m Höhendifferenz für den Südpol und für die Südhemisphäre angeben. Die Zahlenwerte sind von derselben Größenordnung. Es soll dahingestellt sein, inwieweit die Schwankungen reale Bedeutung haben; jedenfalls zeigen die berechneten vertikalen Gradienten, daß wir in unserer Interpolation ungefähr eine Gleichsetzung der Temperaturstruktur im Innern des Eisblocks mit Verhältnissen in der freien Atmosphäre durchgeführt haben, dabei allerdings Detailprobleme, wie bodennahe Inversionen, herausglättend.

Die interpolierte Isothermie des antarktischen Eisblocks

Die wirklichen Temperaturen im antarktischen Eis weichen gewiß von den soeben errechneten ganz bedeutend ab. Sie können nur geothermisch bestimmt werden.

Wir haben das Eis der Antarktis als Teil der Erdkruste zu betrachten. Das entspricht der Tatsache, daß bei den auf dem Eisplateau herrschenden und auch im Eismantel zu erwartenden Temperaturen die Härte und die thermischen Eigenschaften des Eises sich von den Gesteinseigenschaften der Erdkruste nicht grundsätzlich unterscheiden.

Sogar Eis bei 0°C ist härter als Alabaster, allerdings weicher als Kupfer. Bei -44°C ist das Eis härter als Marmor und fast so hart wie Eisen. Mit -70°C ist schon Stahlhärte erreicht. Die Wärmeleitfähigkeit des Eises unterliegt Schwankungen je nach dem Grad der Reinheit. Sie ist jedoch immer mit der Wärmeleitfähigkeit „gewöhnlicher“ Gesteinsarten vergleichbar, von derselben Größenordnung.

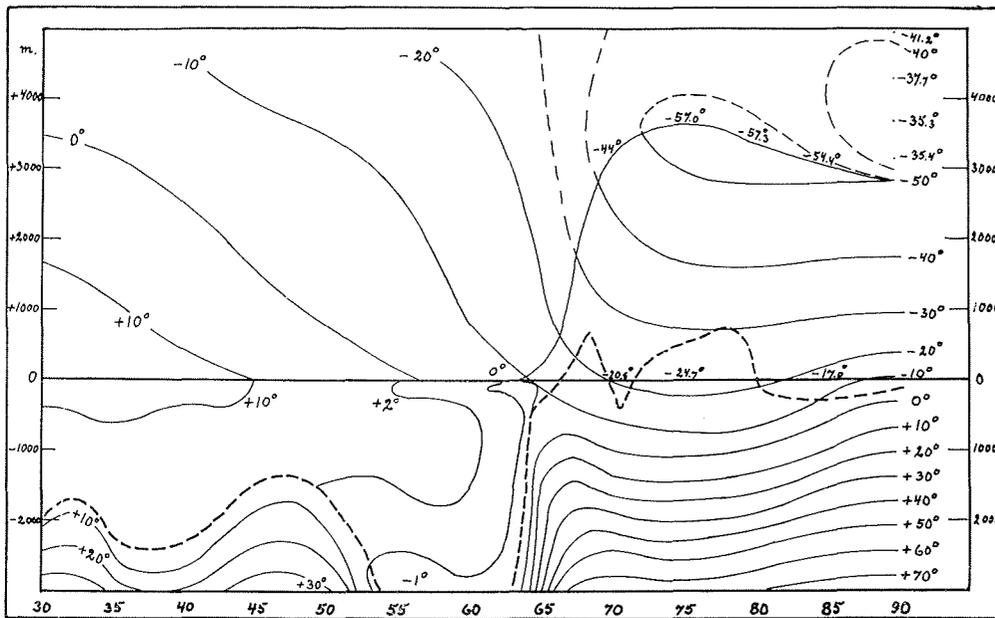
Die Kontinuität von Eis- und Gesteinseigenschaften wäre nur an den Stellen des Eisuntergrundes unterbrochen, wo Temperaturen um den Nullpunkt zu erwarten sind, wo nämlich die latente Schmelzwärme

gewissermaßen als Diskontinuitätsfaktor die Temperaturstruktur beeinflussen müßte. Das ist jedoch nur in ganz wenigen Gebieten zu erwarten, wo der Untergrund des Eises sich tief unter der Meeresoberfläche befindet.

Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen reichen nur bis zu Tiefen von 10 bis 15 Metern unter die Oberfläche. Daraus ergibt sich die Tatsache, daß im antarktischen Eis kontinent die Isothermen sich in konstanten, oder fast konstanten Lagen befinden. Ein An- oder Absteigen der Isoflächen würde Klimaänderung bedeuten. Es ist auch nicht anzunehmen, daß die Isothermen auf horizontalen Schnittflächen in verschiedenen Höhen sich konzentrisch um den Südpol legen. Der südliche Kältepol ist vielleicht unter der höchsten Erhebung des Eisplateaus zu suchen. Demzufolge sollten die Isolinien in meridionalen Querschnitten nach geographischen Längen bestimmt werden.

Da keine Temperaturschwankungen im Eismantel anzunehmen sind, so ist es am günstigsten, solche meridionalen Querschnitte auf mittlere Jahrestemperaturen der Eisoberfläche und des umgebenden Luft- und Wasserozeans zu beziehen.

Leider gibt es augenblicklich wenig Möglichkeiten, solche Meridian-Schnitte zu bearbeiten, da die immer noch relativ spärlichen Temperaturdaten in der Antarktis selten sich einem Meridian entlang konzentrieren. Morton J. Rubin (3) gibt eine graphische Darstellung der mittleren Jahres-Oberflächen-Temperaturen als Funktion von Höhe und Entfernung von der Küste, gemessen zwischen 93° und 107° östlicher Länge, also ungefähr für 100° Ost. Es ist dies ein Meridian, der nicht weit am wahrscheinlichen Kältepol vorbeiführt. Es war möglich, Höhen und Temperaturen immer für 2 Punkte der Temperaturkurve herauszumessen und auf einfachste Art daraus den mittleren meridionalen und vertikalen Temperaturgradienten zu erhalten. Kleine Glättungen der Resultate schienen angebracht. Jedenfalls ergab sich als interessantes Resultat, daß die Seehöhe-Temperatur des Südpols rund -10°C beträgt, ungefähr so viel wie die mittlere Jahrestemperatur bei 65°S und bedeutend höher als die mittlere Temperatur am Nordpol (nach Hann-Süring $-22,7^{\circ}\text{C}$). Auf diesem Längengrad scheint



Figur 2: Schematische Darstellung eines Querschnitts entlang 100° Ost von Isoplethen der Jahrestemperaturen in Luft, Wasser, Eis und Erdkruste zwischen 30° S und Südpol

die tiefste Temperatur auf Meereshöhe in der Nähe von 76° S sich zu befinden.

Figur 2 ist eine zusammengesetzte schematische Darstellung eines Querschnitts entlang 100° Ost von Isoplethen der Jahrestemperaturen in Luft, Wasser, Eis und Erdkruste zwischen 30° S und Südpol. Die unterbrochene Linie ist Meeres- beziehungsweise Eisgrund. Links sind die Isothermen im Meere von +10°, +2° und 0° C nach Deacon, Sverdrup und anderen rekonstruiert. Die Jahresisothermen in der Atmosphäre sind auf Grund der seinerzeit vom Verfasser (4) bearbeiteten Temperatur-Verteilung in der Luft gezeichnet worden. Die Temperaturangaben auf der Oberfläche des Eisplateaus entsprechen der von M. J. Rubin publizierten Kurve. Die auf Seehöhe angegebenen Temperaturen sind daraus deduziert. Die 4 Temperaturangaben über dem Südpol sind auf Grund der Climatological Data for Antarctic Stations (5) für 1959 und der Südpol-Station berechnet. Es zeigt sich, daß die Temperatur-Inversion in der rund ein Kilometer hohen bodennahen Schicht über dem Eisplateau eine ziemlich konstante Erscheinung ist. Die Isothermen wurden entsprechend den Orientierungspunkten frei ge-

zeichnet mit der Tendenz, sie der Geothermie der Erdkruste anzupassen.

Zu bemerken ist, daß die Geo-Isothermen hier so gezeichnet wurden, als wenn sie symmetrisch zur Erdachse liegen; entsprechend würde sich am Südpol ein sekundäres Temperatur-Maximum befinden. Aber das ist gewiß nicht der Fall. Wohl ist anzunehmen, daß der Eismantel der Antarktis durch Wärmeleitung ein Heraufstülpen der Geoisothermen verursacht; demzufolge gibt es eine Wärmeinsel (oder zumindest eine Wärme-Halbinsel) auf Meereshöhe rund um den Südpol, aber der wärmste Punkt in dieser Insel fällt aller Wahrscheinlichkeit nach nicht mit dem Südpol zusammen wegen der unsymmetrischen Struktur des Eismantels und seines festen Untergrundes.

Es würde sehr aufschlußreich sein, den Verlauf der Isothermen im Eismantel auch in anderen Längenschnitten festzustellen. Unserer Zeichnung zufolge haben wir durchgehend nur negative Celsiusgrade im Eismantel. Das bedeutet, daß nirgends im Eis sich Schmelzprozesse abspielen und dabei latente Wärmemengen benötigt werden. Seismischen Untersuchungen zufolge befinden sich — im 100° Ost-Querschnitt — unter

dem Eise zwei Bergrücken bei 68° S und zwischen 72° und 80° S. Ohne Zweifel sind sie isotatisch herabgedrückt. Sie mögen einmal über 2000 m hoch gewesen sein, und es ist möglich, daß die große Vereisung der Antarktis hier begonnen hat. Die von der — 50° C Isotherme umschlossene Eismasse mag ein Remanent eines noch strengeren Klimas während der Eiszeit gewesen sein. Das könnte eine Erklärung dieses Kältetropfens und der darüber befindlichen semipermanenten Temperatur-Inversion sein. Überhaupt könnte eine genaue thermische Vermessung des antarktischen Eises und ein

Vergleich mit der zuvor durchgeführten breitenmäßigen Extrapolation der Temperaturen uns Aufschluß geben über Vergangenheit und möglicherweise auch Zukunft des Klimas der Südhemisphäre.

*

Der Direktion des Wetterbüros der Republik Südafrika bin ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Studie und insbesondere dem Leiter der Forschungsabteilung, Dr. W. L. Hofmeyr, für Hinweise und wertvolle Diskussionen zu aufrichtigem Dank verpflichtet.

Literatur

- (1) SOUTH AFRICA, Weather Bureau. 1965. International Geophysical Year (1957—1958) World weather maps. Pt. III. Southern Hemisphere, south of 20° S. Daily sea level and 500 mb charts. Pretoria, Govt. Print.
- (2) BURDECKI, F. 1966. Surface and sea level temperatures and thermal unrest of the Southern Hemisphere during the summer half-year of the IGY. NOTOS, Pretoria, 15. (Im Druck).
- (3) RUBIN, M.J. 1962. The Antarctic and the weather. Scientific American, New York, 207 (3), 84—94.
- (4) BURDECKI, F. 1955. A study of temperature distribution in the atmosphere. NOTOS, Pretoria, 4 (3), 192—203.
- (5) U.S. Weather Bureau. Climatological data for Antarctic stations: All data THRU June 1957, and January-December 1959. Washington, D. C., 2, 1963.

Geologische und glaziologische Studien in der Westantarktis 1964

Von Hubert Miller, München *

Zusammenfassung: In der Umgebung der Station General Bernardo O'Higgins (Westantarktis) treten komplizierte geologische Kleinstrukturen auf. In der geologischen Geschichte des Magallanesgebietes und der Westantarktis bestehen deutliche Unterschiede, dementsprechend auch zwischen dem Nordast und Südast des Südantillenbogens. Verschiedene glaziologische Beobachtungen aus der Umgebung der Station O'Higgins werden mitgeteilt.

Abstract: In the General Bernardo O'Higgins area (West Antarctica) complicated geological structures have been found. There are differences in the geological history of the Magallanes area and West Antarctica, accordingly also between the northern and southern limb of the Scotia arc. Some glaciological observations of the surroundings of the O'Higgins base are communicated.

Während viele Wissenschaftszweige ganz spezifisch „polare“ Züge tragen können, ist dies bei der Geologie nicht so sehr der Fall. Wir sehen dies schon daran, daß Arktis und Antarktis ganz grundverschiedene Oberflächenform haben: Hier ein großer, von Meeren umgebener Kontinent, dort ein von Festland umschlossener Ozean. Ein weiterer

Grund liegt darin, daß die verschieden alten Gesteine, die wir in der Antarktis finden, ehemals nicht in der gleichen geographischen Breite entstanden sind, in der sie heute liegen.

Die Antarktis, deren nördlichsten Ausläufer ich im Südsommer 1964 kennenlernen durfte¹⁾, ist geologisch deutlich gegliedert: Bewegen wir uns von der dem Indischen Ozean zugewandten Seite gegen die ostpazifische Küste hin, so treffen wir im wesentlichen zunehmend jüngere Gesteine an. In der *Ostantarktis* sind präkambrische, d. h. über 600 Millionen Jahre alte Gneise und Granite am häufigsten. Eine *Zwischenzone* enthält überwiegend paläozoische, gefaltete Sedimente sowie Granite desselben Alters; die *Westantarktische Halbinsel* gehört dagegen im Großen gesehen zum jungen Faltengebirgsgürtel, der den pazifischen Ozean umschließt.

* Dr. Hubert Miller, 8 München 2, Luisenstr. 37/I

¹⁾ Meinen chilenischen Gastgebern danke ich herzlich für die Ermöglichung der Reise.