

(Weather Bureau, Pretoria)

Das Klima des antarktischen Ozeans

I. Nord-Süd-Schnitt zwischen 20 und 40° E

Von

E. Vowinkel

Mit 7 Textabbildungen

Zusammenfassung. Es wird eine Bearbeitungsmethode für die Schiffsbeobachtungen im Antarktischen Ozean entwickelt, die den Besonderheiten der Beobachtungen und der Region Rechnung trägt. Unter Zusammenfassung der Beobachtungen in Felder von 4 Breiten- und 20 Längengraden werden an Hand eines Nord-Süd-Schnittes südlich Afrikas die klimatischen Gegebenheiten des Ozeans besprochen. Für den Sommer wird die Existenz einer isothermen Zone nachgewiesen und es wurden ihre Eigenheiten erörtert. Die vermutliche Lage und Bewegung der Konvergenzzone sowie der subantarktischen Tiefdruckrinne werden behandelt. Soweit möglich, werden an Hand der Wind- und Temperaturdaten die von Jahr zu Jahr auftretenden Schwankungen des Wetters besprochen. Zum Schluß wird an Hand von Drei-Tage-Mitteln ein Überblick über den vermutlichen Witterungsablauf im Sommer gegeben.

Summary. Dealing with the observations from ships in the Antarctic Ocean a working method is developed which takes into account the peculiarities of the data and of the region. The observations are summed up in squares of 4 degrees latitude by 20 degrees longitude to give a north-south cross section, south of Africa, which can serve as a basis for the discussion of the climatic features in this oceanic region. The characteristics of this particular area are examined and the existence of an almost isothermal zone pointed out. The likely position and movement of the zones of convergence and of the subantarctic trough are dealt with. Where possible, the variations between different years are illustrated by means of temperature and wind data. Finally, a general view of the course of weather development during the summer season is attempted by means of three day means.

Résumé. On développe une méthode d'élaboration des observations de bateaux de l'Océan Antarctique en tenant compte des particularités de ces observations mêmes et de la région. Suit une discussion des données climatologiques de l'Océan à l'aide d'un profil méridien au Sud de l'Afrique obtenu par groupement des observations par champs de 4° de latitude et de 20° de longitude. Il existe en été une zone isotherme dont on indique les particu-

larités. La position probable et le mouvement des zones de convergence ainsi que du couloir de basse pression subantarctique est étudié. On discute, dans la mesure du possible, les variations du temps d'année en année sur la base des observations de vent et de température. On donne enfin un aperçu de l'évolution probable du temps en été sur la base de moyennes calculées par trois jours.

I. Einleitung

Südlich der antarktischen Konvergenzzone, welche die kalten antarktischen Wassermassen von den wärmeren gemäßigten Meeren weiter im Norden trennt, und nördlich des antarktischen Kontinents liegt der zirkumpolare antarktische Ozean. Dieses etwa 20 Breitengrade umfassende Gebiet wird in Klima und Wetter von der subantarktischen Tiefdruckrinne beherrscht, dem erheblich kräftigeren und stabileren Gegenstück zum Island- und Aleutentief der Nordhalbkugel. Das Gebiet hat insofern großes meteorologisches Interesse, als hier nirgends meridionale Gebirgs- oder Landmassen die homogene Wasseroberfläche stören, sofern man von der Gebirgsbarriere Südamerikas und der Palmerhalbinsel absieht, die aber in der Drakestraße eine weite Unterbrechung findet. Auch die Luftmassen, die den Ozean von Norden und Süden erreichen, sind weitgehend einheitlich. Überall gelangt von Süden kontinentale Antarktikluft und von Norden maritime Warmluft mit etwa den gleichen Eigenschaften in das Gebiet.

Feste Beobachtungsstationen bestehen, abgesehen von der Palmerhalbinsel und den benachbarten Inseln, die gerade in dem gestörten Gebiet gelegen sind, nicht. Die wenigen um 50° S gelegenen Inseln gehören bereits in die reine Westwindzone und soweit das Material bearbeitet ist [1, 2], läßt es nur ungenügende Schlüsse auf den weiter südlich gelegenen Ozean zu. Die zur Verfügung stehenden Beobachtungen beschränken sich deshalb ausschließlich auf maritime Daten. Da keine regelmäßigen Schifffahrtslinien das Gebiet kreuzen, sind diese spärlicher als in anderen Meeren. Die vorliegenden Bearbeitungen maritimer Daten — in der überwiegenden Zahl auf nationaler Basis — enden gewöhnlich bei 50° S, so daß für den antarktischen Ozean noch keine meteorologische Bearbeitung vorliegt.

In den letzten Jahren wurden in Pretoria etwa 160 000 Beobachtungen der verschiedenen Nationen für diesen Ozean, teils durch Lochen neuer Daten, teils durch Erwerb schon vorhandener Daten, für die Zeit von 1920 bis 1955 zusammengetragen.

Abgesehen von Expeditionsbeobachtungen, etwa der „Discovery“, des „Meteor“ und ähnlicher Schiffe, die in der Gesamtzahl der Beobachtungen nur einen verschwindenden Prozentsatz ausmachen, stammen alle Daten von Walfängern. Daher wird nur in der warmen Jahreszeit, etwa von November bis März, eine genügend große Zahl von Beobachtungen erreicht. Die Bearbeitung dieser Meldungen von Schiffen mit ganz bestimmten, vom normalen Verlauf abweichenden Routen und von verschiedenen Nationalitäten bringen gewisse Besonderheiten mit sich, die eine etwas abweichende Behandlung erfordern:

1. Durch die verschiedenartige Beobachtungstechnik ist sowohl bei visuellen wie bei instrumentellen Beobachtungen das Material uneinheitlich und erfordert zur Gewinnung brauchbarer Mittelwerte eine erheblich größere Anzahl Beobachtungen, als es sonst der Fall ist. Die zusammenezufassenden Felder müssen also erheblich größer gewählt werden.

2. Die Beobachtungsdichte variiert im Laufe der Monate erheblich. Die Walfänger folgen im allgemeinen der Bewegung der Packeisgrenze. Entsprechend verlagert sich das Gebiet hoher Beobachtungsdichte als relativ schmales Band mit fortschreitender Jahreszeit südwärts. Die flächenhafte Darstellung der Wetterelemente wird entsprechend schwierig.

3. In den verschiedenen Jahren bevorzugen die Walfänger unterschiedliche Fanggebiete. Vor allem zwischen der Zeit vor und nach dem zweiten Weltkrieg treten erhebliche Unterschiede auf. In den verschiedenen Feldern, etwa von der Größe von zwei Breitengraden mal fünf Längengraden, stammen deshalb die Meldungen aus recht verschiedenen Jahren. Wie weiter unten gezeigt wird, schwanken die Mittel der Wetterelemente von Jahr zu Jahr erheblich und, wie Versuche ergaben, kann das gerade in einem Gebiet mit geringem Gradienten, wie es der antarktische Ozean im Sommer darstellt, zu erheblichen Fehlern führen.

4. Kommen die Walfänger in gute Fanggründe, so bleiben sie weitgehend stationär und es wird eine reiche Fülle von Meldungen aus demselben Feld verfügbar, während andere Perioden wieder nur wenige Beobachtungen von durchfahrenden Schiffen aus derselben Gegend bringen, wodurch es leicht zu einer Überbewertung gewisser Zeiträume kommen kann.

Auch unter Berücksichtigung dieser Tatsachen ist eine gesicherte flächenhafte Darstellung der Klimaelemente nur für zwei oder drei Monate für begrenzte Räume zu gewinnen und es müssen gewisse Fixpunkte vorhanden sein, an denen die Zuverlässigkeit der stark schwankenden Werte der einzelnen Felder geprüft werden kann. Zur Gewinnung dieser Fixpunkte und, um wenigstens approximative Resultate für einen möglichst langen Zeitraum zu gewinnen, wurde die Untersuchung zuerst auf gewisse große und gut belegte Felder beschränkt. Nach verschiedenen Experimenten erwies es sich als günstig, Felder von 4 Grad Breite und 20 Grad Länge zusammenezufassen. Diese Felder sind zwar relativ groß, und zweifellos werden dadurch gewisse Details verwischt; aber bei der völlig homogenen Oberfläche und den relativ geringen räumlichen Unterschieden zeigte sich, daß auf diese Weise kein heterogenes Material zusammengefaßt wurde.

Bei der Bearbeitung der Felder wurden, so weit möglich, erst die Beobachtungen eines Tages in Tagesmittel zusammengefaßt, um auf diese Weise die ungleichmäßige Verteilung der Beobachtungen auf die Tage — die Zahl schwankt zwischen 0 und 63 pro Tag — zu eliminieren. Die Tageszeit wurde nicht berücksichtigt, da die tägliche Periode nach Berechnungen für das Feld um die Bouvet-Insel für die Temperatur mit etwa $0,8^\circ$ sich als sehr gering ergab. Sofern die Anzahl der Beobachtungstage für ein Element ausreichte, wurden dann für die einzelnen Monate Mittelwerte gebildet. Wie wichtig diese erste Summierung über den Tag ist,

ergeben die folgenden Zahlen für die Temperaturen des Bouvet-Feldes (alle Temperaturen in Grad Fahrenheit).

Februarmittel nach Tagesmitteln 33,6°.

Februarmittel nach Summierung aller Beobachtungen 31,7°.

Die Differenz mag gering erscheinen; berücksichtigt man jedoch die weiter unten diskutierten geringen Gradienten dieser Region, so ergibt diese Differenz bereits Verschiebungen der Isothermen von mehreren hundert Meilen.

Die Ergebnisse der Großfelder sollen an Hand eines meridionalen und eines zonalen Schnittes besprochen werden. Die Auswahl der Schnitte mußte notwendig von der Beobachtungsdichte bestimmt werden. Wegen der einheitlichen Oberfläche sind jedoch die Abweichungen von Ort zu Ort vergleichsweise gering und die etwa aus dem Nord-Süd-Schnitt gewonnenen Ergebnisse dürfen mit geringen Modifikationen auch auf andere Gebiete des Ozeans übertragen werden.

II. Lufttemperatur

Für alle Monate, für die mindestens zehn Tagesmittel vorlagen, wurde ein Monatsmittel berechnet. An Hand des Monats mit der größten Zahl von Beobachtungsjahren wurden die anderen Monatsmittel reduziert. Lagen für einen Monat weniger als fünf Jahre mit genügend Beobachtungen vor, hatte der Monat aber andererseits über 50 Beobachtungstage in verschiedenen Jahren, so wurde die Reduktion unter Zusammenfassung aller Beobachtungsjahre und durch einen Vergleich mit den gleichen Jahren des Bezugsmonats vorgenommen.

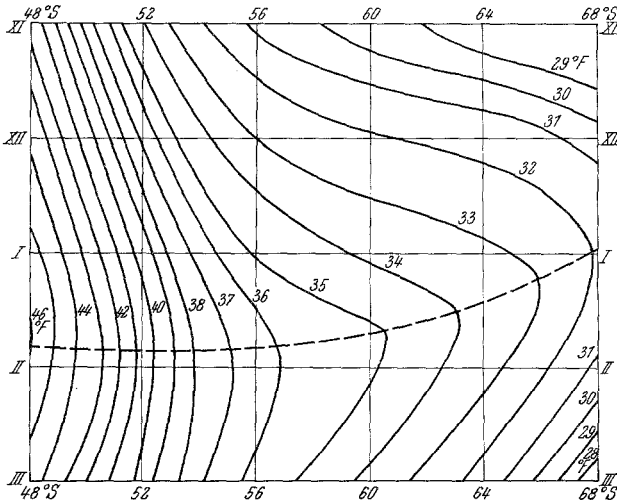


Abb. 1. Mittlerer Temperaturverlauf zwischen 48 und 68° S.

Die so gefundenen Mittel zeigt Abb. 1, wobei der Temperaturverlauf in 48° S aus [3] extrapoliert wurde. Deutlich ersichtlich ist der erhebliche Unterschied des Temperaturganges zwischen der isothermen Zone, die in

südlichen Breiten im Sommer klar hervortritt, und der weiter nördlich gelegenen Zone mit starkem Temperaturgradienten. Im Süden ist der sommerliche Temperaturanstieg für maritime Verhältnisse sehr kräftig: in 60° S steigt das Mittel von November bis Februar um 5,6°, in 48° S nur um 4,2°. Das Maximum tritt in 68° S bereits im Januar ein, also ohne die sonst in maritimen Gebieten gefundene Verzögerung. Erst in 56° S wird die normale maritime Lage des Maximums erreicht und nach Norden treten keine weiteren Änderungen ein. Die Verfrühung des Maximums im Süden ist auf den Einfluß der Antarktis zurückzuführen und es kann bereits hieraus geschlossen werden, daß in Küstennähe ständig ablandige Winde für die Ausweitung der kontinental-antarktischen Verhältnisse verantwortlich sein müssen. Die isotherme Zone andererseits, die wohl die markanteste Erscheinung des sommerlichen antarktischen Ozeans darstellt, ist in erster Linie auf die vom schmelzenden Packeis um 32° gehaltenen Wassertemperaturen und die das ganze Jahr über konstante Lage der antarktischen Konvergenzzone zurückzuführen. Nähere Einzelheiten über die Konvergenzzone und die Gründe des Entstehens dieser isothermen Zone werden in Teil III gegeben.

Für die isotherme Zone dieser Jahreszeit findet man auf der Nordhemisphäre kein entsprechendes Verhalten, wie etwa die Vergleichszahlen für die gleiche Breite des Nordatlantik zeigen:

geograph. Breite.	48°	56°	60°	64°	68°
Juli: Nordhemisphäre .	62,7°	56,4°	54,0°	49,2°	43,0° F [4]
Januar: Südhemisphäre	45,9°	36,1°	35,1°	33,4°	30,5° F

Diese gradientlose Zone stellt ein zirkumpolares Entstehungsgebiet einer außerordentlich einheitlichen Luftmasse, der maritimen Kaltluft, dar. Es ist von Interesse, daß es sich hier um eines der wenigen zyklonalen Luftmassenentstehungsgebiete der Erde handelt.

Für den Winter liegen keine Beobachtungen vor, aber mit Hilfe ähnlich gelegener Inselstationen läßt sich ein angenähertes Bild über den Temperaturverlauf gewinnen. Als Grundlage für Abb. 2 dienten zusätzlich zu den Beobachtungen der Ozeanfelder die Monatsmittel von GAUSS nach [5], der Orcadas nach [6] und von 48° S, 20 bis 40° E nach [3] sowie die Eisgrenzen nach [7]. Das Bild ist selbstverständlich nur als Annäherung zu betrachten. Folgende Ergebnisse können als gesichert angesehen werden: Die Zone gesteigerter Temperaturgegensätze um 50° S (antarktische Konvergenzzone) hat ihre Bedeutung wesentlich im Sommer, wo südlich die isotherme Zone folgt. Im Herbst wird der Temperaturkontrast in der Nähe der nordwärts sich bewegenden Packeisgrenze erheblich größer als an der Konvergenzzone. Diese Zone eines gesteigerten Gradienten bewegt sich mit dem Packeis nordwärts und im Hochwinter tritt sie so weit nördlich auf, daß die antarktische Konvergenzzone als ihr abgeschwächter Ausläufer erscheint. Mit dem Einsetzen des Frühjahrs wandert der starke Temperaturkontrast südwärts und löst sich auf oder verschwindet in Antarktika. Die Packeisgrenze bleibt dagegen noch im Norden. Wie bei der Trägheit des Packeises zu erwarten,

stoßen die Isothermen im Herbst über die Eisgrenze nordwärts vor und folgen ihr dann weitgehend, der Kontinentalrand schiebt sich sozusagen in den Ozean vor. Im Frühjahr schneiden die Isothermen das Packeis

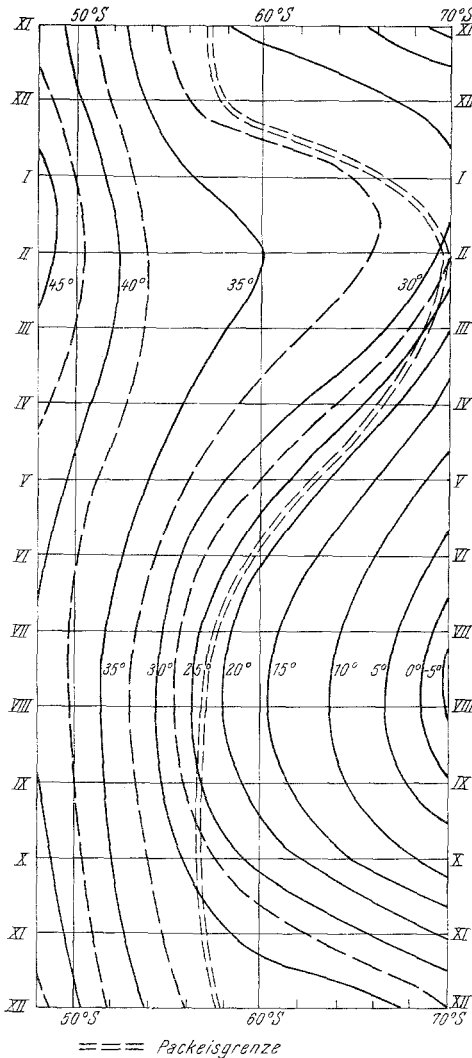


Abb. 2. Mittlerer jährlicher Temperaturgang

in der anderen Richtung. Zur Zeit des Aufbrechens des Eises bildet dieses keine geschlossene Fläche mehr, Wasserrinnen erscheinen, es ist sozusagen eine Übergangszone zwischen Kontinent und Ozean, und entsprechend können die Isothermen früher zurückweichen als das Packeis. Im Winter dürfte sich über dem geschlossenen Eis eine Zone relativ schwacher Gradienten befinden [8], während am Kontinentalrand selbst noch einmal eine schwache Verstärkung zu erwarten ist, da hier der Wärme- fluß vom Meer durch das Eis sein Ende findet.

Nähere Aussagen über das Verhalten der Temperatur können nur für den Sommer gemacht werden. Für diese Zeit gibt die Temperaturfrequenz, das heißt die Häufigkeit der Temperaturen für einzelne 2°-Intervalle, die thermischen Eigenschaften im einzelnen wieder (Abb. 3). Als Grundlage für die Berechnung dienten hier nicht die Tagesmittel, sondern die Einzelbeobachtungen, wobei nur Monate mit mehr als 200 Werten berücksichtigt wurden. Die außerordentliche Konstanz der sommerlichen Temperaturen zeigt sich in Abb. 3 darin, daß im häufigsten Temperaturinter-

vall überall 30% überschritten und im Zentrum der isothermen Zone sogar beinahe 40% erreicht werden. Weiterhin ist für diese Region der im Sommer nach der warmen Seite flachere Häufigkeitsabfall typisch. Synoptisch bedeutet dies, daß die Warmlufteinbrüche häufiger und besser definiert sind als die Kaltluftvorstöße. Im Norden, wo die

Warmluft, die von der Region nördlich der antarktischen Konvergenzzone kommt, noch frisch ist, ist entsprechend der Häufigkeitsabfall nach der warmen Seite am schwächsten. Im Dezember, wenn wegen des schmelzenden Eises die Temperatur im Süden noch tief liegt, ist in 56° S die Wirkung der Warmluftvorstöße am größten, die Abweichungen der Maxima vom Modalwert erreichen dann mit 11,5° ihren höchsten Betrag. Nach Süden wird die Erscheinung immer weniger deutlich. Die Hauptursache ist der isotherme Gürtel, der die von Norden kommende Warmluft so umgestaltet, daß sie keine extremen Temperaturen mehr zu bringen vermag. Entsprechend sind in 68° S die Verhältnisse denen des Nordatlantiks vergleichbar, wo nach [4] die positiven und die negativen Abweichungen vom Mittel sich etwa die Waage halten. Die in Abb. 3 gezeigten Januarverhältnisse stellen, da zu dieser Zeit die isotherme Zone am weitesten ist, den Höhepunkt der sommerlichen Verhältnisse dar.

In dieser Zeit ist auch die Kaltluftproduktion über Antarktika am geringsten, wie etwa die in Tabelle 1 gegebenen Abweichungen der Minima vom Modalwert zeigen.

Während so das Wettergeschehen des Sommers durch außerordentlich gleichmäßige Temperaturen und die Abwesenheit von Kältewellen ausgezeichnet ist und nur die Wärmewellen sich als bedeutende Wetterereignisse abzeichnen, tritt zum Herbst hin eine drastische Änderung ein. Die Frequenzisoplethen des März zeigen diese Erscheinung in 68° S, wo der Herbst um diese Zeit schon voll seine Herrschaft angetreten hat. Die Konzentration um das häufigste Temperaturintervall hat von 33% im Januar auf 19% im März abgenommen und der Häufigkeitsabfall ist nun steil nach der warmen und flach nach der kalten Seite. Dies bedeutet, daß zwar das häufigste Temperaturintervall wegen der warmen Unterlage noch hoch liegt, indem die häufigste Temperatur in der Tat dieselbe wie im Januar ist; doch bestimmen jetzt an Stelle der sommerlichen Wärmewellen die Kälteausbrüche von Antarktika das Wettergeschehen und bringen häufige und kräftige negative Abweichungen in der Temperatur. Zwar wird die Kaltluft über dem offenen Ozean schnell umgestaltet, doch ist noch in 64° S im März der Häufigkeitsabfall nach der kalten Seite erheblich flacher.

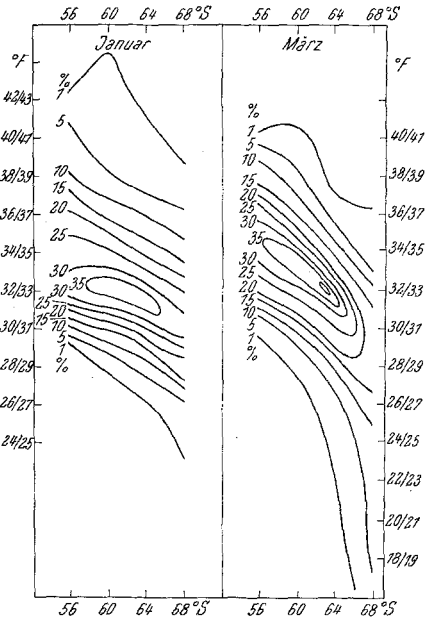


Abb. 3. Schnitt der Temperaturfrequenzen

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nov.	56°	30,4	30,5	93	0,45	17,9	4	4	76	16	19	13
	60	29,5										
Dez.	56	32,4	30,9	92	0,47	13,5	2	10	75	13	18	9
	60	32,1	30,8	88	0,64	30,5	4	12	76	8	22	7
	64	31,8	30,6	90	0,52	24,7	7	7	79	7		
	68											
Jan.	56	34,4					21	13	64	2		
	60	33,8	32,6	88	0,64	35,3	3	11	72	14	13	10
	64	33,3	32,3	86	0,54	29,7	9	18	52	21	3	3
	68	31,8	32,2				7	14	50	29	11	4
Febr.	56	35,1		91	0,78							
	60	35,1	33,9	87	0,97	56,8	1	14	74	11	14	12
	64	33,4	33,3	86	0,69	50,9	3	13	65	19	9	3
	68	30,5	31,9	81	0,82	69,5	6	13	68	13	13	3
März	56	35,5	35,3	88	0,99	61,5	1	8	86	5	28	12
	60	33,4	33,8									
	64	31,3	32,8	90	0,62	61,8	1	9	74	16	16	8
	68	27,1	31,3	83	0,89	133,1	3	15	66	16	1	1

1. Mittel der Lufttemperatur in °F.
2. Mittel der Wassertemperatur in °F.
3. Relative Feuchte in %.
4. Verdunstung in mm pro Tag.
5. Nettowärmefluß in cal/cm² Tag.
6. Cumulus humilis in %.
7. Cumulus congestus und Cumulonimbus in %.
8. Stratus und Stratocumulus in %.
9. Gemischte Bewölkung in %.
10. Nebeltage in %.
11. Nebelbeobachtungen in %.
12. Niederschlagstage in %.
13. Niederschlagsbeobachtungen in %.
14. Schauer in % der Niederschlagsbeobachtungen (Nichtschauer ergibt sich als Differenz gegen 100%)
15. Flüssiger Niederschlag in %.
16. Fester Niederschlag in % (gemischter Niederschlag ergibt sich als Differenz von flüssig plus fest gegen 100%).
17. Nordkomponente des Windes in Knoten.
18. Südkomponente des Windes in Knoten.
19. Westkomponente des Windes in Knoten.
20. Ostkomponente des Windes in Knoten.
21. Mittlere Windstärke in Knoten.
22. Mittlere Bewölkung in Achteln.

Eine Vorstellung vom Grad der Umgestaltung der Kaltluft gibt der Verlauf der Frequenzisoplethen. Nimmt man etwa an, daß zirkulationsmäßig die extreme Kaltluft in 68 und 64° S gleich häufig ist, so erwärmt sich die durch die 5% Häufigkeit ausgezeichnete Luftmasse auf dieser Strecke im Mittel um 9° F.

Das Packeis beginnt nicht vor Ende März langsam nach Norden vorzudringen und so lange dürften die herblich-winterlichen Temperaturverhältnisse auf den äußersten Süden beschränkt bleiben. Mit dem Vordringen der Eisgrenze, wie sie aus Abb. 2 zu ersehen ist, breiten sich diese

Klimadaten

		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Nov.	56°	59	31	18	10	75	6,5	4,2	10,9	1,2	17,4	6,8
	60	28	37	0	0	100						
Dez.	56	50	26	19	10	76	3,9	3,3	7,0	1,3	17,2	6,5
	60	46	25	17	7	86	4,0	3,9	4,9	3,9	12,5	6,8
	64	32	22	31	15	71	2,7	4,7	2,1	5,7	11,3	7,0
	68	10	8	20	0	100					10,9	
Jan.	56	34	25	31	37	57	4,1	3,7	11,6	1,1	16,2	5,4
	60	58	27	26	7	81	3,0	4,4	4,6	3,6	12,3	6,2
	64	44	21	21	9	83	2,0	5,0	2,1	4,6	10,6	6,1
	68	37	25	4	0	98	0,9	3,5	1,6	3,7	7,7	6,2
Febr.	56	50	59	34	48	44					20,5	
	60	44	32	39	18	64	6,9	5,2	5,7	3,8	17,0	5,5
	64	69	30	31	8	79	2,3	3,9	2,5	5,7	11,9	6,6
	78	59	29	30	4	74	2,5	3,0	2,1	8,4	13,2	6,3
März	56	53	29	33	35	38	10,0	2,9	12,6	0,3	19,6	6,8
	60	56	29	31	29	57	9,0	2,6	9,8	1,4	18,6	6,5
	64	57	28	34	13	69	4,7	3,5	6,1	3,4	14,0	6,6
	68	53	31	13	2	92	2,7	4,4	2,1	7,9	14,0	6,1

Bedingungen dann nordwärts aus und für den Winter dieser Zone dürfte etwa die in [9] gegebene Häufigkeitsverteilung der Temperaturen charakteristisch sein.

Die thermischen Windrosen (Abb. 4) zeigen in 56° S im Dezember und Januar ein abnormes Verhalten. Vor allem im Januar kommen die kältesten Winde aus N bis E und die wärmsten aus SE und im Januar auch aus W bis NW. Berücksichtigt man die Tatsache, daß geringe Bewölkung zu hohen Temperaturen führt, so kann man synoptisch schließen, daß niedrige Temperaturen bei N-Winden wohl in Warmluft auftreten; wegen der dichten Bewölkung bleibt die Temperatur aber niedriger als bei Luftzufuhr aus SE auf der polwärtigen Rückseite, wo die Bewölkung geringer ist. In dem gradientschwachen Gebiet, wo die Luftmassenunterschiede gering sind, kann der Einfluß südlicher Luftzufuhr durch Strahlungsunterschiede überkompensiert werden. Im März, wenn der Temperaturgradient nach Süden wieder zugenommen hat, werden dann gerade die SE-Winde besonders kalt.

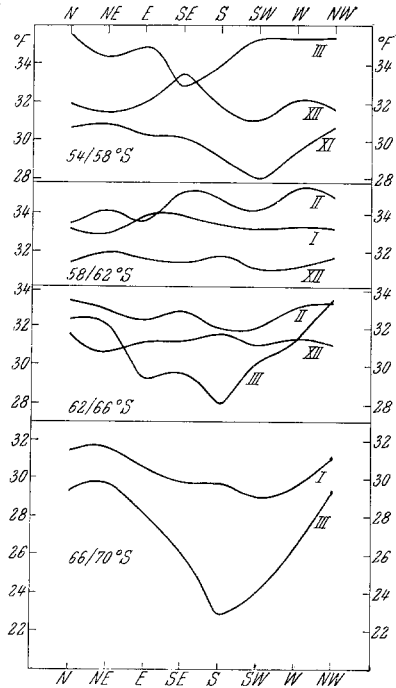


Abb. 4. Thermische Windrosen

Das südlich folgende Feld zeigt ein ähnliches Verhalten, die Temperaturunterschiede sind allerdings entsprechend der Lage im Zentrum des isothermen

Gebiets noch geringer. In 64° S macht sich von Februar ab bereits der antarktische Einfluß geltend, S und SW werden die Richtungen kältester Luftzufuhr. Im März sind dann alle Winde, die vom antarktischen Kontinent kommen, kalt und im gesteigerten Maße finden sich diese Verhältnisse auch in 68° S.

Die thermischen Windrosen zeigen somit für den Sommer, daß Luftmassenunterschiede im antarktischen Ozean praktisch nicht existieren. Der isotherme Gürtel ist so breit und die Umwandlung über dem Meer so intensiv, daß die Unterschiede der Luftmassen verschiedener Ursprungsgebiete am Boden völlig ausgeglichen sind, während im Herbst mit der Intensivierung der antarktischen Kaltluft die Luftmassenunterschiede kräftig zunehmen.

III. Wassertemperatur

Beobachtungen der Wassertemperatur sind erheblich seltener als die der Lufttemperatur. Da erstere jedoch weniger kurzfristige Änderungen zeigt, wurde angenommen, daß bereits fünf Tage mit Beobachtungen für die Ermittlung der mittleren Monatstemperatur hinreichend seien. Die in

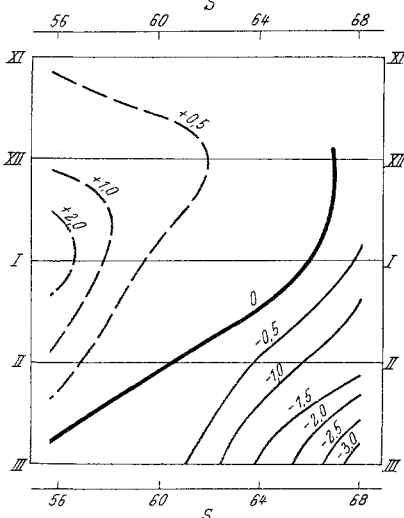


Abb. 5. Temperaturdifferenz Luft—Wasser
+ = Luft wärmer

der Tabelle 1 gegebenen Mittelwerte wurden im einzelnen in der gleichen Weise ermittelt wie die der Lufttemperatur. Die auffallendste Erscheinung ist der steile Anstieg von Dezember auf Januar, der etwa in allen Breiten gleichzeitig stattfindet. Zweifellos hängt er mit dem aus Abb. 2 ersichtlichen plötzlichen Rückgang der Packeisgrenze zusammen.

Zur Berechnung der Differenz Luft—Wasser können die gegebenen Mittel der beiden Elemente nicht verwandt werden, da sie auf verschiedenen Kollektiven beruhen. Es wurde deshalb diese Differenz gesondert für alle Fälle mit Beobachtungen von Luft- und Wassertemperatur berechnet. Wegen der geringen Anzahl der zur Verfügung stehenden Meldungen wurden alle Werte ohne Berücksichtigung

der einzelnen Jahre zu Monatsmitteln zusammengefaßt. Abb. 5 zeigt als typisch für den Sommer, daß die Luft wärmer als das Wasser ist. Die positive Differenz ist im Norden am stärksten, wo die Warmluft erst kürzlich die antarktische Konvergenz überschritten hat und nimmt nach Süden mit der zunehmenden Umgestaltung der Luft in Bodennähe im isothermen Gebiet ab. In der Nähe der antarktischen Küste bleibt die Differenz auch im Sommer negativ. Der Herbst bringt dann, wie zu erwarten, eine Ausbreitung der negativen Differenzen über den ganzen Ozean.

IV. Wärmehaushalt

Beobachtungen der Feuchte sind nur und selten stammen vorwiegend aus der Nachkriegszeit. Wegen der relativ großen Unsicherheit der Beobachtungen können die in Tabelle 1 gegebenen Werte nur als rohe Näherung betrachtet werden. Trotz dieser Bedenken dürften sie größenordnungsmäßig ein richtiges Bild ergeben.

Mit Hilfe der Feuchtwerte können Berechnungen zum Wärmehaushalt angestellt werden. Obwohl wegen der Unsicherheit der Ausgangswerte kaum mehr als approximative Ergebnisse zu erwarten sind, erschien die Berechnung der Mühe wert, da nirgends über dem antarktischen Ozean besser fundierte Werte vorhanden sind. Unter Berücksichtigung der mittleren Windstärke wurde mit Temperatur und Feuchte nach [10] die Verdunstung nach der Formel $E = 0,142 (e_w - e_a) F_a$ berechnet (e = Dampfdruck in Millibar, w = Wasser, a = Luft, F = Windstärke in m/sec). Für die Berechnung der Proportion von Verdunstung zu Wärmefluß wurde die BOVENSche Formel $R = 0,64 \frac{p}{1000} \left(\frac{t_w - t_a}{e_w - e_a} \right)$ benutzt (t = Temperatur). Die Tabelle 1 zeigt, daß der Nettowärmefluß immer vom Wasser gegen die Luft gerichtet ist, wobei im Norden die geringsten und im Süden die höchsten Werte erreicht werden. Interessanterweise ist auch die Verdunstung im Norden am geringsten. Der Temperaturfall nach Süden spielt nämlich bei dem geringen Gradienten kaum eine Rolle, dagegen nimmt die Feuchte nach Süden hin wegen der dort dominierenden Herkunft der Luft vom trockenen Antarktika ab, wodurch die Verdunstung erhöht wird. Der direkte Wärmefuß ist entsprechend dem Vorzeichen des Temperaturgefälles Luft—Wasser zu Anfang des Sommers gegen das Wasser gerichtet; die Werte bleiben aber gering und beachtliche Wärmemengen werden erst im Herbst, nachdem das Temperaturgefälle sich umgekehrt hat, vom Wasser an die Luft abgegeben.

V. Bewölkung und Wetter

Die Bewölkung ist, wie in einem so weitgehend zyklonalen und maritimen Gebiet zu erwarten ist, ständig sehr hoch. Nirgends sinkt das Monatsmittel unter fünf Achtel. Es ist zu beachten, daß bei der Bewölkung wie bei allen folgenden Elementen kein klarer jährlicher Gang mehr vorliegt; die Variationen werden viel stärker durch Wettertypen bedingt und entsprechend können die hier gewonnenen Resultate nur in ganz allgemeiner Form auf den ganzen antarktischen Ozean übertragen werden und sind in erster Linie nur für die Großregion repräsentativ, in der der Schnitt liegt. Betrachtet man nur das Gebiet nördlich von 68° S, das heißt das rein ozeanische Gebiet, so ist die Bewölkung im Frühjahr am höchsten (Tab. 1). Um diese Zeit werden sich über dem schmelzenden Packeis niedrige Inversionen mit ausgedehnten Stratusfeldern in der gleichen Weise finden, wie sie im Sommer nach [11] über dem Nordpolarmeer auftreten. Deshalb zeigt auch die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Wolkenformen zu dieser Zeit eine größere Häufig-

keit von Schichtwolken als später im Jahr. Mit dem Schmelzen des Packeises kommt es zum sommerlichen Bewölkungsminimum. Die Temperaturdifferenz gegen das Wasser ist gering geworden, von der Oberfläche her sind also keine Einflüsse mehr vorhanden, die zur Bewölkungszunahme führen, und es wird die im Raum eines Zentraltiefs zu erwartende Bewölkungsmenge gefunden, wie sie in ähnlicher Weise auch im Gebiet des Islandtiefs auftritt. In der Frequenz der einzelnen Bewölkungsstufen zeigt sich in 60° S, wo Werte für Dezember und Januar vorhanden sind, eine deutliche Abnahme der geschlossenen Bewölkung zugunsten der mehr durchbrochenen Bewölkungsgrade. Gegen den Herbst hin steigt die Bewölkungsmenge im allgemeinen wieder an. Zu dieser Zeit liegt aber kein von der Oberfläche ausgehender Einfluß vor, der die Zunahme verursachen könnte. Auch jetzt wieder nimmt die Schichtbewölkung besonders zu. Damit verbunden ist eine Zunahme der Windstärke und eine deutliche Verlagerung der Hauptwindrichtung auf NW. Es handelt sich um eine großzügige Umstellung der Zirkulation, die auch in den in [12] gegebenen, auf ganz anderer Grundlage gewonnenen Druckkarten dieser Monate zum Ausdruck kommt. Während nämlich im Januar und Februar in 45° S der Trog in der Westwindzone noch deutlich bei 40 bis 50° E liegt, verlagert er sich zum März auf 10 bis 20° E; das Gebiet des Schnittes fällt somit stärker in die Vorderseitenströmung des Troges und entsprechend steigt die Bewölkung. Gleichzeitig verschiebt sich auch die Tiefdruckrinne nach S bis über 64° S, so daß das ganze Gebiet bis nahe an den antarktischen Kontinent von diesem Prozeß erfaßt wird, und erst in 68° S ist diese Wirkung verschwunden. Der Vorgang erfaßt, wie beim W-E-Schnitt gezeigt wird, sehr weite Gebiete, er kann als erstes Anzeichen für die im Herbst einsetzende mehr zelluläre Zirkulationsform angesehen werden.

Tabelle 2. *Bewölkung*
a) *Häufigkeit der Bewölkung in %*

	0	1	2	3	4	5	6	7	8 Achtel
56° S	1	1	2	1	4	2	7	9	73
60°	1	2	8	1	7	2	7	10	62
64°	1	5	4	1	6	3	6	7	67
68°	2	7	4	2	5	2	5	8	65

b) *Mittlere Bewölkung*

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
56° S	7,5	7,3	7,0	7,0	6,9	6,7	7,1	7,4 Achtel
60°	7,1	6,3	6,6	6,7	6,5	6,6	6,6	7,0
64°	6,9	7,4	7,3	6,4	6,4	6,7	6,5	6,5
68°	6,7	7,1	7,1	6,6	5,4	5,4	6,3	7,1

Der Zusammenhang zwischen Bewölkung und Windrichtung ist in den nördlichen Feldern nur sehr gering, wird aber, wie Tabelle 2 zeigt, nach Süden zu deutlicher. Die S-Winde haben hier erheblich geringere Bewölkung als die nördlichen Richtungen. Hier an der Südgrenze des isothermen Gürtels ist die antarktische Luft deutlich trockener, was sich in diesen Bewölkungszahlen äußert. Nach Norden zu hat dagegen bereits

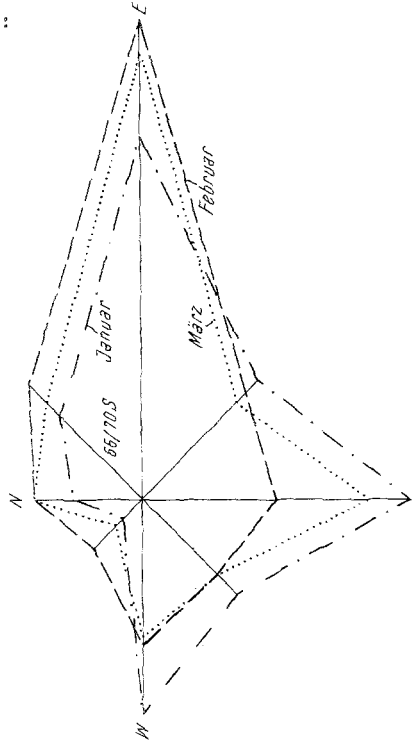
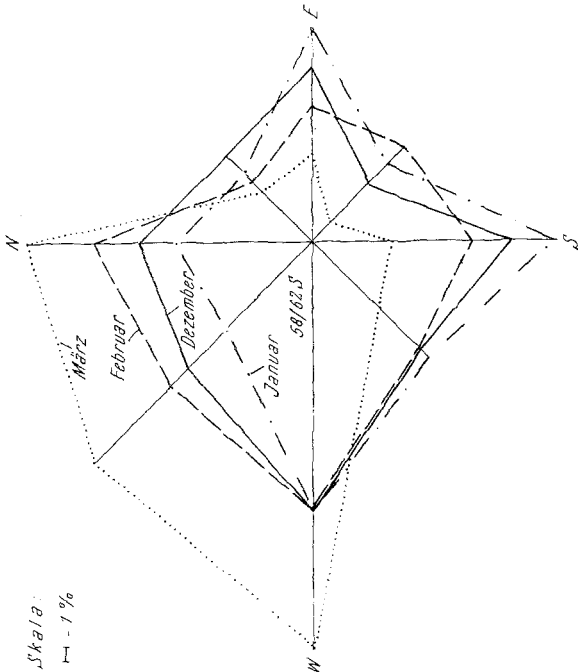
in 64° S diese Luft soviel Feuchte aufgenommen und ist so stark umgestaltet, daß sich die Bewölkung erheblich weniger von der aus Norden kommenden Luft unterscheidet und bis 56° S sind die Unterschiede völlig verschwunden.

Zu den in der Tabelle 1 gegebenen Häufigkeitsverteilungen der Wolkenarten muß noch bemerkt werden, daß die Zahl der Beobachtungen recht gering ist und daß sich vor allem bei der Auszählung sehr charakteristische Unterschiede sowohl zwischen den einzelnen Schiffen als auch zwischen den einzelnen Nationalitäten ergaben. Der persönliche Faktor geht also recht bedeutend in diese Zahlen ein und da die Beobachtungen fast durchgängig von Nichtfachleuten gemacht wurden, konnte nur eine großzügige Einteilung in Wolkengruppen vorgenommen werden.

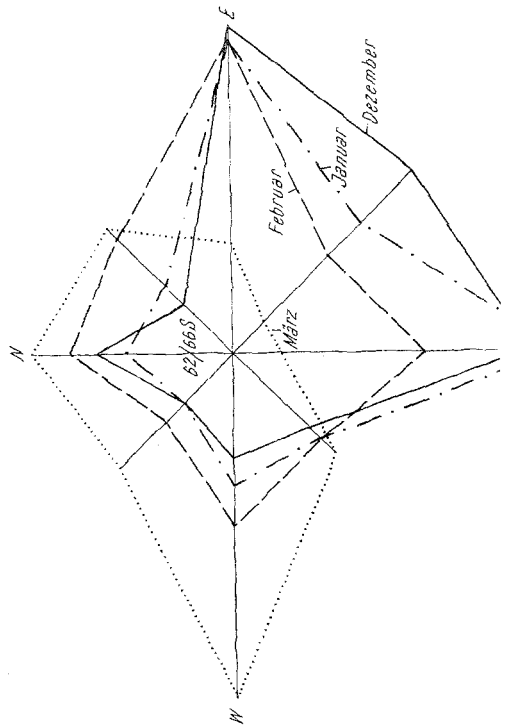
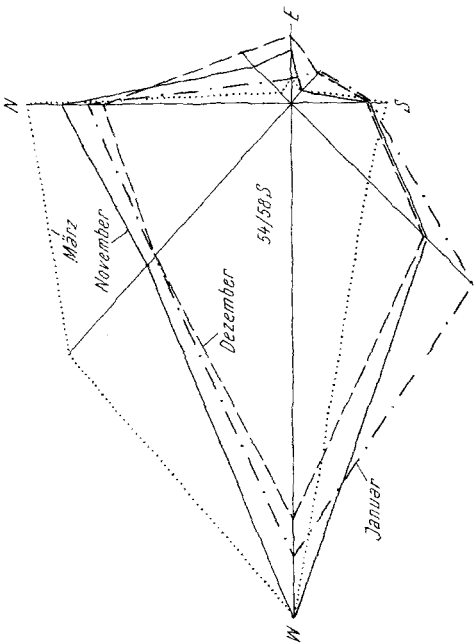
Auch für Niederschlag und Nebel besteht keine ausgesprochene Breitenabhängigkeit und die Zahlen dienen in erster Linie dem Vergleich mit anderen Klimagebieten. Die Prozentzahlen für die Niederschlagsbeobachtungen geben vergleichbare Werte mit anderen maritimen Atlanten, die Niederschlagstage sollen einen Vergleich mit Landstationen ermöglichen. Man kann in den Feldern eine mittlere Beobachtungsdichte von zehn Beobachtungen pro Tag annehmen. Es ist anzunehmen, daß die angegebenen Zahlen der Niederschlagstage etwas höher liegen als die klimatologischen Werte ständiger Stationen. Zählt man nämlich die Häufigkeit für ein Schiff mit geringer Ortsänderung gesondert aus, so ist die Anzahl der Niederschlagstage um etwa 5 bis 6% höher als im Mittel der Tage mit mehreren Schiffen. Anders ausgedrückt, kommt es nur recht selten vor, daß an einem Tag in demselben Feld von dem einen Schiff Niederschlag beobachtet wird und vom anderen nicht. Es ist mithin anzunehmen, daß innerhalb 10% die Niederschlagstage den klimatisch gebräuchlichen Wert repräsentieren. Bei den Zahlen für die verschiedenen Niederschlagsarten ist zu beachten, daß es sich nur um annähernde Werte handeln kann; denn etwa der Unterschied zwischen „Schauer“ und „Niederschlag mit Unterbrechungen“ wird vielfach von Nichtmeteorologen nicht genau eingehalten, wodurch die Werte erheblich verfälscht werden können. Immerhin genügen die Zahlen, um ein qualitatives Bild der Niederschlagstypen dieser Klimaprovinz zu geben.

VI. Wind

Für die klimatische Betrachtung von Regionen mit wenigen Stationen hat der Wind als vektorielle Größe eine ganz besondere Bedeutung, da er Schlüsse auf die Zirkulation zuläßt. Außerdem stellt er das bestgesicherte Element dar, denn gerade von Seeleuten ist anzunehmen, daß sie Richtung und Stärke des Windes zuverlässig beobachten. Die Häufigkeit der Windrichtungen wurde nach der achteiligen Skala ausgezählt. Die Tatsache, daß die Nachkriegsbeobachtungen in der sechsendreißigteiligen Skala gemacht wurden und diese nicht genau in der achteiligen aufgeht, wurde berücksichtigt und die notwendigen Umrechnungen vorgenommen. Bei der Bearbeitung der Windkomponenten wurde eine Zahl von 50 Beobachtungen pro Monat als untere Grenze angesetzt.



Skala:
1% = 1 mm



Die Windstärken wurden nur ausgezählt, wenn über 1000 Beobachtungen vorlagen.

Die Windrosen in Abb. 6 zeigen sehr charakteristisch das Witterungsregime des antarktischen Ozeans. In 56° S ändert sich die Windverteilung im Laufe der Monate nur wenig. Durch das völlige Zurücktreten der E-Winde ist diese Windrose typisch für die südliche Westwindzone. Die Richtungen NW, W und SW machen im Januar zusammen 68% aus; der entsprechende Wert für 50 bis 55° N und 25 bis 30° W beläuft sich nach [4] im Juli auf 66%. Das Vorwiegen nördlicher Richtungen in 56° S deutet auf ein Vorherrschen der Vorderseitenströmung der Tiefdruckgebiete. Die mittlere Windstärke ist in allen Monaten hoch (Tab. 3), doch ist die größte

Tabelle 3. Häufigkeit der verschiedenen Windstärken in %

		0/9	10/19	20/29	30/39	40/49	50/59	≥ 60 Knoten
56° S	XI.	26	44	16	11	2	1	
	XII.	43	34	12	9	1	< 1	< 1
60° S	XII.	48	36	9	5	1	< 1	< 1
	I.	48	36	10	6	< 1	< 1	
60° S	I.	59	30	7	3	1		
	II.	52	34	8	4	1	< 1	< 1
68°	II.	46	38	7	6	1	1	1
	III.	44	34	11	7	2	1	1

Intensität der Westwindzone hier bereits überschritten, denn in 47,5° S liegt die mittlere Windstärke im Januar bei 24 Knoten. Die seltenen Ostwinde, die wohl mit antizyklonalen Phasen verbunden sind, zeichnen sich gegenüber den W-Winden durch geringere Häufigkeit stärkerer Winde aus. Am häufigsten sind die östlichen Winde im Dezember mit 13%. Nach diesem relativen Abflauen der W-Zirkulation zu Anfang des Sommers, indem die W-Komponente des Windes beinahe um 3 Knoten sinkt, nimmt diese im Januar wieder deutlich zu, und zwar vor allem aus südwestlicher Richtung. Im Dezember und Januar sind nördliche und südliche Windkomponente, wie die Tabelle I zeigt, in ihrer Stärke recht gleich, woraus für diese Zeit auf eine fast reine Westlage für diese Breiten geschlossen werden kann. Das Hervortreten der SW-Winde gerade im Januar kann mit der Abschwächung des Temperaturanstiegs und der Abnahme der Bewölkung in Verbindung gebracht werden. An und für sich sollte die geringe Bewölkung gerade zu einer Erhöhung der Temperatur führen; doch läßt die verstärkte Kaltluftadvektion dies nicht zum Ausdruck kommen. Gleichzeitig zeigt auch die Niederschlagshäufigkeit einen deutlichen Rückgang und die Schauertätigkeit nimmt proportional zu; dasselbe zeigen auch die Quellwolken. Der Frühsommer dieser Breiten ist mithin durch reines Westwetter charakterisiert. Für den Februar liegen nicht genügend Meldungen vor, dagegen zeigt der März eine kräftige Umstellung. Die SW-Winde gehen zugunsten von NW und N zurück, die jetzt ihre größte Häufigkeit erreichen. Das deutet ein Vorwiegen der NW-Lagen an mit kräftiger Warmluftadvektion, und entsprechend nimmt die Bewölkung wieder zu und die Quellwolken werden von Schichtwolken verdrängt. Die Temperatur ist im März gegenüber der des Januar noch deutlich erhöht. Auch die Nebel-

tage zeigen in dieser Zeit ein Maximum und in der Temperaturfrequenz spiegelt sich der Vorgang ebenfalls: obgleich der Gradient nach Süden erheblich, wahrscheinlich auf mindestens den dreifachen Wert des Sommers zugenommen hat, verändert sich der Häufigkeitsabfall in den letzten Temperaturintervallen nur unwesentlich; dies ist eine Wirkung der abgeschwächten Kaltluftzufuhr. Diese Wetterumstellung entspricht der bereits erwähnten Verschiebung des Troges in der Westwindzone und sie findet sich ebenfalls auf Marion Island und auf den Kerguelen.

Der fundamentale Unterschied des Wetterablaufes in 60° S gegenüber dem in 56° S wird durch einen Vergleich der Windrosen deutlich. Während der Sommermonate ist die Häufigkeitsverteilung auf die verschiedenen Richtungen im Süden äußerst gleichmäßig, ein Anzeichen dafür, daß das Gebiet in der Nähe der subantarktischen Tiefdruckrinne liegt; entsprechend geht der mittlere resultierende Wind von 11 auf 2 Knoten zurück. Die wirkliche mittlere Windstärke aber nimmt nur von 16 auf 12 Knoten ab. Es zeigt sich hierin, daß die Tiefdruckrinne nicht als ein ständig anzutreffendes Gebilde anzusehen ist, sondern daß sie das mittlere Ergebnis des ständigen Vorbeizuges recht intensiver Tiefdruckwirbel mit relativ hohen Windstärken ist. Im Dezember, wo für 56 und 60° S die Häufigkeit der Windstärken vorliegt, ist die Sturmhäufigkeit (größer als 40 Knoten) sogar für beide Felder die gleiche und erst bei Berücksichtigung der Windstärken bis 30 Knoten wird die Häufigkeit im Norden größer. Dies ist klimatisch wie auch zirkulationsmäßig von Bedeutung. Es zeigt sich nämlich, daß die im Mittel weitgehend geschlossene, zirkumpolare Tiefdruckrinne keine Barriere für den nordsüdlichen Luftmassenaustausch darstellt. Zahlenmäßig faßbar ist diese Tatsache mit Hilfe der N/S-Komponente. Die Größe der Summe der Nord- und der Südkomponente, unabhängig vom Vorzeichen, gibt ein Maß für den stattfindenden Austausch. Im Lauf der Monate findet zwischen 54 und 70° S keine wesentliche Änderung statt, so daß über alle Monate, bis einschließlich Februar, aber unter Ausschluß von März, gemittelt wurde. Die folgenden Zahlen zeigen zwar einen deutlichen Rückgang nach Süden, aber gerade die Passage der Tiefdruckrinne bringt eher eine Steigerung der N/S-Komponente und erst weiter südlich findet eine deutliche Abnahme statt.

56° 60° 64° 68° S

Summe der N/S-Komponente 8,6 9,1 6,9 5,0 Knoten.

Dies erklärt, daß trotz der im Mittel auf weite Strecken geschlossenen Tiefdruckrinne, abgesehen von der Windrichtung, in keinem der Wetterelemente in dieser Region eine Diskontinuität zu finden ist, sondern daß diese, sofern man überhaupt von einer solchen sprechen kann, an der Grenze des Packeises bzw. des Kontinentes gefunden wird.

Die starken Schwankungen in der Windrichtung sollten eigentlich eine Verflachung der Temperaturfrequenz bringen. Daß dies nicht der Fall ist, erklärt sich aus der Lage im Zentrum des gradientlosen Gebietes und aus den entsprechend geringen Temperaturunterschieden der einzelnen Windrichtungen. In der Bewölkung aber macht sich die Folge von Tiefdruckgebieten und dazwischengelegenen Hochdruckkeilen deut-

lich bemerkbar. Das Mittel liegt etwas niedriger, vor allem aber zeigt sich in der Häufigkeitsverteilung ein Ansteigen der schwachen und mittleren Bewölkungsgrade auf Kosten bedeckten Wetters (Tab. 2). Vor allem bei den nördlichen Windrichtungen liegt die Bewölkung im Mittel niedriger, was dahin gedeutet werden kann, daß es sich hier nicht mehr um Warmsektorbewölkung handelt, sondern daß die Wolkendecken von Okklusionen stammen und entsprechend nicht so persistent und geschlossen sind. Die Niederschlagsverhältnisse ändern sich gegenüber dem nördlichen Feld nur unwesentlich. Schon im Februar bahnt sich die Umstellung zum Herbst an, die im März dann ähnlich wie in 56° S zum deutlichen Vorwiegen der nordwestlichen Winde führt. Auch hier steigt die Bewölkung vom sommerlichen Minimum dann steil an. Die Tiefdruckrinne muß sich außerdem südwärts verlagern und vor allem muß es im Westen zu mehr stationären Kernbildungen kommen. Die erwähnte Zirkulationsumstellung macht sich auch hier bemerkbar. In der Temperaturfrequenz zeigt sich sogar, daß die häufigste Temperatur im März noch etwas höher liegt als im Februar. Nur die jetzt bereits auftretenden tiefen Temperaturen führen zu einem niedrigeren Mittel als im Vormonat.

Das Feld 64° S liegt bereits während des ganzen Sommers eindeutig südlich der Tiefdruckrinne. Das Frühjahr bringt ein Vorherrschen südöstlicher Winde, was auf Kernbildungen in der Tiefdruckrinne weiter östlich schließen läßt. Niederschlags- und vor allem Nebelhäufigkeit zeigen eine Abnahme gegenüber den Verhältnissen weiter im Norden, während die Bewölkung im wesentlichen gleichmäßig hoch bleibt. Auch die Windstärke nimmt gegenüber dem Norden ab. Trotz der größeren Nähe des Kaltluftreservoirs und des Vorherrschens südlicher Windkomponenten nimmt die Schauertätigkeit im Vergleich zum Norden ab, was auf eine Inversion in niedriger Höhe deutet, über der sich Warmluft aus Norden befindet. Bei den Wolkentypen zeigt sich ein Zurücktreten der stratiformen Bewölkung auf Kosten der gemischten Wolkenformen. Eine Durchsicht der einzelnen Beobachtungen zeigt das Vorwiegen der Wolkenformen der Schlüsselziffer 8, die Kaltluft unter einer Inversions- oder Okklusionsbewölkung anzeigt. Von Februar an macht sich auch hier die oben erwähnte Zirkulationsumstellung bemerkbar. Es ist jedoch von Interesse, daß hier auch im März die NE-Winde häufig bleiben, während nur die E- und SE-Winde extrem selten sind. Die Windrose spricht dafür, daß sich der tiefe Druck einerseits nach Westen verlagert hat, andererseits aber auch W- und NW-Lagen, die über das Feld nach Süden vordringen, recht häufig sind. Es wechseln also zwei heterogene Lagen, einmal tiefer Druck im Westen und Nordwesten und hoher Druck im Osten, also eine Art Blockierung, andererseits Westlagen, wobei die Zentren tiefen Druckes in geringer Entfernung südlich des Feldes vorbeiziehen. Die Bewölkung zeigt im Herbst hier nicht mehr die markante Zunahme wie weiter nördlich, der Einfluß der Zirkulationsumstellung des März nähert sich hier seinem Ende. Dagegen ist mit den Kernbildungen im Westen eine deutliche Zunahme der Sturmhäufigkeit aus nördlicher bis östlicher

Richtung verbunden, die bereits im Februar einsetzt. Die gleichmäßigen Temperaturen der thermischen Windrose finden ein Ende, der Einfluß Antarktikas macht sich bei südlichen Winden bemerkbar und der Herbst kündigt sich in der typischen Änderung der Temperaturfrequenz an. Auch die Bewölkungsmittel für die Windrichtungen zeigen größere Unterschiede; im Januar betragen diese zwischen der heitersten und der bedecktesten Richtung nur 0,8 Achtel, im März steigen sie auf 1,4 Achtel, ebenfalls ein Zeichen, daß die Luftmassenunterschiede nach allen Richtungen zunehmen.

In 68° S, in der Nähe des Kontinents, sind die Windverhältnisse ähnlich stabil wie im äußersten Norden, nur hier mit Vorherrschen der östlichen Richtungen. Von Interesse ist ein Vergleich mit den Verhältnissen der Nordhemisphäre. Das Feld 70/80° N und 30/40° E, das im Juli in ähnlicher Nähe des Packeises liegt wie 68° S im Südsommer, zeigt eine völlig ausgeglichene Windverteilung:

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C
70/80° N, 30/40° E	14	3	8	6	11	8	11	8	31% [13]
Dänemarkstraße	4	25	10	4	3	3	3	2	46% [4]

Ähnlich liegen in gewisser Weise die Dinge in der Dänemarkstraße, also in der Nachbarschaft des grönländischen Inlandeises. Es kann daraus geschlossen werden, daß ähnlich stabile Windverhältnisse, wie sie in der Westwindzone bestehen, im Bereich der polaren Ostwinde nur auftreten, wenn als zusätzlicher Faktor noch eine topographische Ursache stabile Windverhältnisse begünstigt. Als bedeutender Unterschied gegenüber den Verhältnissen in der Dänemarkstraße zeigt sich aber, daß die Windstillen im Süden bei weitem seltener sind. Denn im Januar treten in 68° S nur 2% Windstillen auf. Der Januar bringt hier auch relativ die häufigsten westlichen Winde, was anzeigt, daß zur Zeit der größten Erwärmung über Antarktika wenigstens schwache Störungen nach Süden vordringen. Die deutliche Verminderung der NW-Winde zeigt, daß derartige Störungen eher im Osten als im Westen zu finden sind. Ein erheblicher Unterschied zwischen der Zirkulation der einzelnen Monate besteht nicht.

An Hand der Monatsmittel der W- und E-Komponente läßt sich die Position der subantarktischen Tiefdruckrinne als Scheide der vorwiegend westlichen und östlichen Winde bestimmen. Durch Interpolation ergibt sich für Dezember 60,6, Januar 61,0, Februar 61,5 und März 64,8° S. Von Dezember bis Februar ist die Südwärtsverschiebung von etwa 1 Grad praktisch belanglos, so daß die Lage während dieser Monate als konstant angenommen werden kann. In der Südwärtsverschiebung im März zeigt sich der Einfluß der bereits erwähnten Märzsingularität, jedoch dürfte diese Bewegung mit fortschreitender Jahreszeit, wenn auch langsamer, weitergehen. Denn während Marion und Heard Island ihren höchsten Druck im Winter aufweisen, erreicht dieser an der antarktischen Küste sein Minimum im Winter-Spätwinter, was nur in einer Verlagerung

der Tiefdruckrinne nach Süden seine Ursache haben kann. Die Tiefdruckrinne liegt also im Winter südlich der Packeisgrenze, eine recht bemerkenswerte Tatsache, auf die schon in [12] hingewiesen wurde.

VII. Witterungsverlauf an Hand der Dreitagemittel

Der Witterungsverlauf läßt sich im einzelnen an Hand übergreifender Dreitagemittel verfolgen. Als Minimalzahl für deren Berechnung wurden 15 einzelne Tagesmittel bzw. beim Wind 50 Beobachtungen

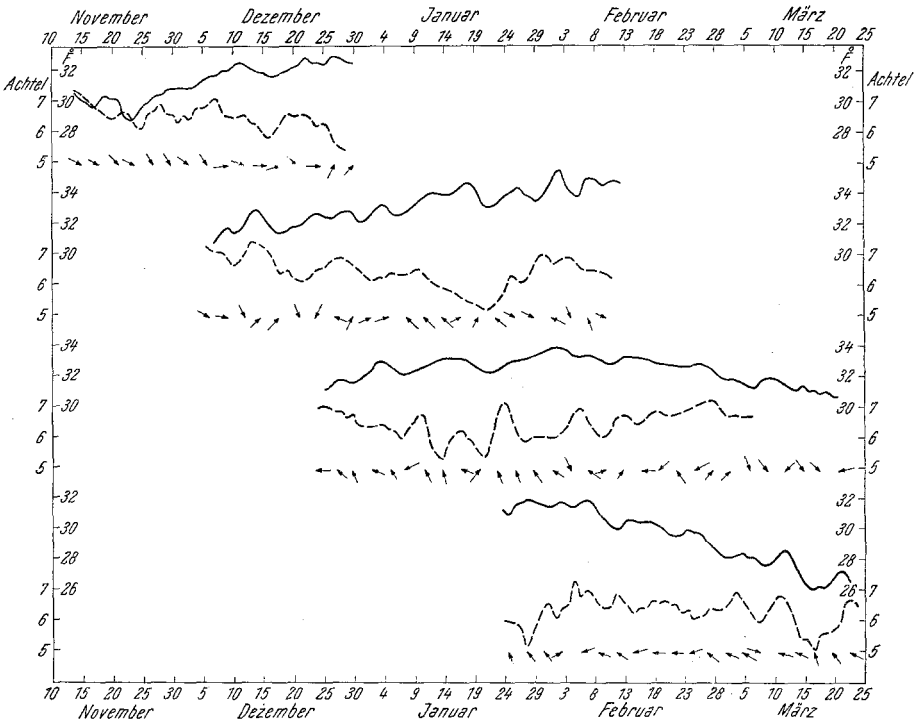


Abb. 7. Kurven der Dreitagemittel

während eines Dreitagezeitraums angesetzt; im Mittel lag die Zahl der verfügbaren Tagesmittel bei 25. Zur Berechnung wurden erst die individuellen Tagesmittel an Hand der Mitteltemperatur des betreffenden Monats auf das langjährige Mittel reduziert, um Temperatursprünge, die lediglich durch das Vorwiegen extremer Jahre für eine Periode hervorgerufen waren, zu eliminieren. Beim Wind wurde nur die Häufigkeit berücksichtigt, da bei einer relativ geringen Anzahl von Beobachtungen gelegentlich besonders hohe Windstärken den resultierenden Windvektor zu leicht verfälscht hätten. Die Windpfeile in Abb. 7 geben also nur die resultierende Richtung ohne Stärke. Die zugrunde gelegte Mindestmenge an Beobachtungen ist gering, dürfte aber zur Klarstellung der

großen Vorgänge genügen. Es ist hier als günstig anzusehen, daß die Beobachtungstage nicht aus einer geschlossenen Periode von fünf Jahren stammen, sondern zufällig über einen Zeitraum von 15 Jahren verstreut sind, wodurch das Hervortreten spezieller Züge eines gewissen Zeitraums unwahrscheinlicher wird.

Abb. 7 zeigt abgesehen von kurzfristigen Irregularitäten, die durch das unzureichende Material hervorgerufen sind, einige bemerkenswerte Charakteristika, die wohl reell sind. Im Norden, in 56° S, findet sich der erste kräftige Anstieg auf das sommerliche Niveau vom 23. November bis 11. Dezember, wobei die Temperatur um $0,2^{\circ}$ F pro Tag steigt, während der mittlere Anstieg von November bis Februar nur $0,05$ Grad pro Tag beträgt. Dieser Anstieg ist begleitet von nordwestlichen Winden und relativ hoher Bewölkung. Der Wärmavorstoß kommt, wie die Kurven und der Verlauf des Windes zeigen, in mindestens zwei Wellen, unterbrochen von geringerer Bewölkung, bei mehr westlichen Winden. Den Abschluß findet diese Erwärmung mit einer deutlichen Winddrehung auf W, die bis dahin vorherrschenden NW-Lagen werden wohl durch eine mehr westliche Zugrichtung der Tiefdruckgebiete verdrängt und gleichzeitig geht die Bewölkung zurück. In der Frequenzkurve finden diese Ereignisse ihren Ausdruck im Rückgang der Temperaturschwankung von 17 auf 13° F von Dezember auf Januar. Mit dem Januar bricht die Kurve für 56° S ab, es ist aber nach dem monatlichen Temperaturverlauf zu erwarten, daß eine ähnlich kräftige Erwärmungsperiode noch einmal im Januar oder Anfang Februar auftritt.

In der Kurve für 60° S ist gerade das Ende dieses fröhsommerlichen Temperaturanstieges noch erfaßt; er endet hier am 14. Dezember, also nur wenig später als weiter nördlich. Nach dem Gang der Monatsmittel zu schließen, ist hier der Anstieg um diese Zeit noch kräftiger als weiter nördlich. Diese Periode dürfte mit dem Hauptaufbrechen des Eises zu identifizieren sein und dies macht sich hier natürlich kräftiger bemerkbar als weiter nördlich. Das Ende der Erwärmung ist hier durch einen Kältevorstoß mit südlichen Winden markiert, dessen Wirkung in abgeschwächter Weise auch in 56° S zu spüren war. Auch die Bewölkung zeigt denselben Rückgang wie im Norden. Die Tatsache, daß dieselbe Erscheinung in 56 und 60° S gefunden wurde, verstärkt die Sicherheit der Ergebnisse; denn gerade im Fröhsommer stammen die Beobachtungen in diesen Breiten aus verschiedenen Jahren, da um diese Zeit die Walfänger sich nahe am Eisrand halten und daher die Beobachtungen je nach dessen Lage vorwiegend aus 56 oder 60° S stammen. Nach Abklingen der Kälte-welle hält die fröhsommerliche Periode in 60° S bis etwa zum 8. Januar an. Die Tiefdruckgebiete ziehen mit ihren Kernen hart südlich 60° S vorbei, wie die vorwiegend westlichen Winde andeuten. Die Bewölkung bleibt deutlich niedriger als vor und während der Erwärmungsperiode. Um Mitte Januar kommt es dann zu einem zweiten Temperaturanstieg, mit dem der „Hochsommer“ seinen Anfang nimmt. Die Winde drehen für eine Zeitlang auf SE; es scheint zu Kernbildungen in der Tiefdruckrinne weiter östlich zu kommen. Daß die Erwärmungsperiode gerade zu

dieser Zeit gefunden wird, liegt daran, daß etwa am 8. Januar in 64° S der Anstieg auf das sommerliche Niveau sein Ende gefunden hat; selbst die nun von südlicher Richtung nach 60° S transportierte Luft ist warm. Die Erwärmungsperiode im zweiten Januardrittel ist wohl ein im wesentlichen auf den Norden des antarktischen Ozeans beschränkter Vorgang; in 64° S macht sie sich zwar noch bemerkbar, jedoch nicht mehr so deutlich. Eine Durchsicht der Jahre, für die Wetterkarten für diese Zeit vorlagen, zeigte, daß die Erwärmung, verbunden mit schwachen südlichen Winden, auf der Ostseite kräftiger Tiefs auftrat, wenn die Tiefdruckrinne nach Westen offen blieb und Absinken mit Wolkenauflösung eintrat. Eine wirklich antizyklonale Phase konnte nicht gefunden werden. Abgeschlossen wird diese erste Wärmewelle des Hochsommers durch einen kräftigen Kaltluftvorstoß mit südwestlichen Winden um den 22. Januar. Eine ähnliche Wärmewelle bringt noch der Anfang Februar und in dieser Zeit wird in 60 und 64° S gewöhnlich die Jahreshöchsttemperatur erreicht.

Da die Kurve für 60° S Anfang Februar ebenfalls abbricht, können die herbstlichen Verhältnisse nur für das Gebiet weiter südlich untersucht werden. In 68° S findet der Sommer etwa am 8. Februar sein Ende und zu dieser Zeit kommt es zu dem ersten kräftigen Temperaturfall und das alte Niveau wird auch nach dessen Abklingen nicht wieder erreicht, während in 60° S die warmen Wassertemperaturen den Rückgang noch deutlich hintanhaltend. Hier kann vom Einsetzen des Herbstes nicht vor den letzten Februartagen gesprochen werden, wo mit südwestlichen Winden der erste Kaltluftenbruch zu verzeichnen ist, der sich auch im Süden in einem weiteren kräftigen Temperaturrückgang äußert. Dieser Kaltluftenbruch wird in 64° S durch die schon erwähnten Nordwestlagen abgelöst, die in den Winden deutlich zum Ausdruck kommen und den Temperaturfall verlangsamten, während dieser in 68° S in beschleunigtem Tempo seinen Fortgang nimmt.

VIII. Zirkulations- und Klimaschwankungen

Bei allen Elementen zeigen sich ganz erhebliche Schwankungen der Werte von Jahr zu Jahr. Dies ist in einem Gebiet so geringer Gradienten besonders bemerkenswert. Bei der Temperatur beispielsweise bedeutet eine Verschiebung des Monatsmittels von 2° F im Sommer, daß dann dieselben Verhältnisse herrschen, wie in einem 6 bis 8 Breitengrade weiter südlich oder nördlich gelegenen Gebiet. Tabelle 4 zeigt an einem Beispiel, daß das allgemeine Niveau, um das die einzelnen Elemente pendeln, zwischen Vor- und Nachkriegszeit erheblich variiert. Das vorhandene Material reicht nicht aus, um zu entscheiden, ob es sich um eine größere Klimaschwankung oder nur um eine kurzfristige Bewegung handelt. Es kann hier nur die Tatsache als solche eine Erwähnung finden.

Auch die oben diskutierte subantarktische Tiefdruckrinne weist im Laufe der Jahre erhebliche Schwankungen auf. In den meisten Jahren genügen zwar die Beobachtungen nicht zu einer genauen Festlegung,

Tabelle 4. Abweichungen der einzelnen Jahre vom Mittelwert für Januar

	1.		2.		3.		4.				
	60° S	64° S	60° S	64° S	60° S	64° S	60° S	64° S			
1933	-1,9	-1,5	1,3	.....	.....	.....	0,3	-2,5	-1,6	-0,6
1934	-1,5	-0,2	1,5	.....	.....	.....	0,3	-2,0	-0,1	2,1
1935	-1,1	2,0	1,3	.....	.....	.....	-1,2	-1,4	-1,3	-0,4
1936	-1,9	0,5	1,7	.....	.....	.....	7,7	7,0	3,0	3,5
1937	-1,7	-0,6	1,6	.....	.....	.....	-0,8	1,3	0,1	-0,6
1938	-3,0	0	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1939	-1,6	-0,6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1946	2,4	2,3	0,2	-0,9	-2,7	4,2	-1,1	3,5	.....	.....
1947	1,7	2,5	-2,4	-0,9	-1,7	1,5	-2,0	2,8	.....	.....
1948	-0,7	1,5	-1,6	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1949	2,9	2,7	-2,0	.....	-3,7	2,6	-0,8	1,5	.....	.....
1950	-2,3	.....	1,0	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1951	0,2	0,7	1,8	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1952	2,4	2,8	0,3	0,4	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1953	-0,3	0,6	0,7	-1,3	0,8	3,7	-1,6	1,8	0,3	0,3
1954	2,1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1955	1,3	0,0	1,4	0,2	2,5	-2,8	0,4	0,1	0,1	-1,8

1. Mittlere Lufttemperatur in °F
 2. Mittlere Wassertemperatur in °F
 3. Mittlere Bewölkung in Achtteln
 4. Mittlere Windkomponenten in Knoten in folgender Reihenfolge: Nordkomponente, Südkomponente, Westkomponente, Ostkomponente

jedoch im Dezember und Januar wurden gesicherte Positionen gefunden, die zwischen 57 und 68° S liegen. Einen näheren Einblick in Lage und Schwankung der Tiefdruckrinne gibt das Verhältnis der West- zur Ostkomponente (Tab. 5). Je größer die Verhältniszahl, desto stärker

Tabelle 5. Häufigkeit der Verhältniszahlen der West- zur Ostkomponente des Windes in %

	≤ 0,25	0,26/0,50	0,51/0,75	0,76/1,00	1,01/1,50	1,51/2,00	2,01/3,00	≥ 3,01
50° S	60	27		13				
60°	18	12		6	6	34	6	18
64°		9	4	14	18	14	9	32
68°		6		13	6		13	62

der E-Wind und desto seltener wird das Gebiet von im Süden vorbeiziehenden Tiefs beeinflusst. Liegt die Verhältniszahl unter 0,25, kann praktisch reine Westdrift angenommen werden. Um 56° S herrscht praktisch immer die Westdrift vor und nur bei äußersten Zirkulationsanomalien passieren die Kerne der Tiefdruckgebiete unmittelbar südlich des Feldes. Um 60° S sind die Ostwinde bereits erheblich häufiger, eine reine Lage in der Westwindzone kommt nur in 18% aller Monate vor, dieselbe Häufigkeit wie in Monaten mit reinen E-Winden. Um 64° S sind bereits ein Drittel aller Monate einwandfrei von E-Winden bestimmt. Aber hier wie auch in 68° S ist beachtlich, daß überhaupt noch kräftige W-Wind-Monate vorkommen; eine Verschiebung der Tiefdruckrinne nach Süden ist offenbar häufiger und weitreichender als eine nach Norden.

Es ist bei allen Windbetrachtungen zu berücksichtigen, daß es in der südlichen Westwindzone viel mehr zulässig ist, von der Bodenströmung her Schlüsse auf die Zirkulation zu ziehen, als sonstwo. Das beruht einmal auf der Abwesenheit kräftiger winterlicher Inversionslagen, wie sie etwa über den Kontinenten auftreten, und dann darauf, daß im Süden Isobaren und Isothermen weitgehend parallel laufen und entsprechend der thermische Wind vom wirklichen nur unwesentlich verschieden ist.

Berücksichtigt man auch die N/S-Komponente, so kann über die Zirkulationsformen bei verschiedener Lage der Tiefdruckrinne folgendes ausgesagt werden:

Bei normaler Lage der Tiefdruckrinne befindet sich der Norden vorwiegend in der Vorderseitenströmung ost-südöstlich ziehender Tiefdruckgebiete. Reine Westlagen sind selten. Um 60° S hat man normalerweise die Warmluftströmung verlassen. Nach Süden zu wird das Vordominieren einer mehr oder weniger geschlossenen Tiefdruckrinne zum dominierenden Faktor, der sich in gleichmäßiger Verteilung der N/S-Komponente äußert.

Extreme Südwärtsverlagerungen der Tiefdruckrinne bringen im Norden keine so deutlich ausgeprägte N-Komponente und die Westlage herrscht bis über 60° S, das ganze Drucksystem scheint mit schwächerer Neigung der Zugbahnen nach Süden verlagert.

Extreme Nordwärtsverschiebungen sind mit kräftiger S-Komponente gekoppelt, SE-Winde wiegen durchaus vor und es muß zu stärkeren Kernbildungen in der Tiefdruckrinne kommen.

Abgesehen vom Wind ist lediglich die Temperatur häufig genug beobachtet, um die Schwankungen des Elements zu untersuchen. Kein Monat existiert, der entlang des ganzen Querschnittes eine hinreichend große Zahl von Beobachtungen aufweist, es wurden deshalb alle Monate zusammengefaßt. Allgemein haben die negativen Abweichungen vom Mittel eine etwas größere Häufigkeit und sind entsprechend schwächer. Betrachtet man die Abweichungen unter Zusammenfassung des Querschnittes, so nimmt die Häufigkeit der negativen Abweichungen mit fortschreitender Jahreszeit ab und ihr Betrag zu. Im Dezember sind 61% aller Jahre zu kalt, im Januar 52%, im Februar 49% und im März 43%. Es sind also während der Erwärmungsperiode intensive Abweichungen nach der kalten Seite relativ selten, schwächere dagegen häufig, die möglicherweise mit der größeren oder geringeren Ausdehnung des Packeises zusammenhängen. Intensive Abweichungen vom Normalwert kommen bei abnormalen Strahlungsbedingungen vor, die intensive Erwärmung bringen. Im Herbst dagegen sind die intensiven Abweichungen mit verfrühten Kältevorstößen verbunden. Es zeigt sich nämlich, daß die Häufigkeitsverteilung der Temperatur in diesen Jahren ein abnormes Überwiegen des negativen Astes bringt. Allgemein besteht eine deutliche Verbindung zwischen der normalen Frequenzkurve und den Anomalien; extreme Anomalien treten nach der Richtung auf, in der die mittlere Frequenzkurve flacher verläuft.

Die auftretenden Anomalien haben, soweit die Daten einen Schluß zulassen, sowohl zeitlich wie räumlich große Persistenz. Betrachtet man die einzelnen Jahre, so waren von 8 Fällen, in denen 3 und mehr Felder für einen Monat vorlagen, in 75% die Temperaturabweichungen überall dieselben, und in 45 Fällen, wo mindestens 2 Felder für einen Monat vorlagen, betrug die Zahl 80%. In den 6 Fällen, wo dasselbe Feld für drei aufeinander folgende Monate belegt war, betrug die Häufigkeit desselben Vorzeichens 75% und bei zwei Monaten (20 Fälle) 77%. Diese Zahlen zeigen deutlich, daß es sich bei den Abweichungen um großräumige, den ganzen antarktischen Ozean in seiner Breite überdeckende Vorgänge handelt, die während einer Saison nur selten ihr Vorzeichen ändern. Sicher spielt für diese Persistenz die Abhängigkeit der Wettervorgänge von der Verbreitung des Packeises eine wesentliche Rolle. Der Mangel an genügenden Eismeldungen gestattet aber noch nicht, eine Erklärung für diese Zusammenhänge zu geben.

Literatur

1. PEPPER, J.: The Meteorology of the Falkland Island Dependencies. 1944–1950. London 1954.
2. VOWINCKEL, E.: Synoptische Klimatologie vom Gebiet Marion Island. *Notos*, **3**, 12 (1954).
3. Koninkl. Nederlands Meteorologisch Instituut: Indien Ocean, Oceanographic and meteorological Data. De Bilt 1952.
4. Monthly meteorological charts of the Atlantic Ocean. Air Ministry. London 1948.

5. Deutsche Südpolarexpedition 1901—1903. Bd. 3. Berlin 1909.
6. Servicio meteorologico national: Datos climatológicos y geomagnéticos, Islas Orcadas del Sur, Periodo 1903—1950. Buenos Aires 1951.
7. MACKINTOSH, N. A., Discovery Reports. Bd. 23. Cambridge 1946.
8. SIMPSON, G. C.: British Antarctic Expedition 1910—1913. Bd. 1. Calcutta 1919.
9. VOWINCKEL, E.: Ein Beitrag zum jährlichen Witterungsablauf auf den Orcadas del Sur. *Notos*, **3**, 287 (1954).
10. JACOBS, W. C.: Large-scale aspects of energy transformation over the oceans. *Compendium of Meteorology*, p. 1057. Boston 1951.
11. SVERDRUP: Klima des antarktischen Ozeans. In Köppen-Geiger, *Handbuch der Klimatologie*.
12. VOWINCKEL, E.: Southern Hemisphere Weather Map Analysis: 5 year pressures. *Notos*, **4**, 17 (1955).
13. Monthly meteorological charts and ocean current chart of the Greenland- and Barents seas. Marine Divisions, Met. Office, Air Ministry, London.