

## Ozean und Antarktis.

VON ERICH V. DRYGALSKI, München.

Es sind 30 Jahre vergangen, seit auf dem XI. Geographentage zu Bremen der Plan einer deutschen Südpolarexpedition entstand, der durch die Fahrten und Forschungen des „Gauß“ 1901/03 seine Ausführung fand. Die Ausarbeitung der wissenschaftlichen Ergebnisse hat nach der Heimkehr über 20 Jahre in Anspruch genommen, wobei freilich der Krieg überaus hemmend gewirkt hat. Schmerzliche Lücken, die durch den Tod getreuer Gefährten entstanden, ließen sich erst nach langen Bemühungen füllen, soweit überhaupt. Im ganzen sind über 90 Mitarbeiter tätig gewesen. Von den 20 starken Quartbänden und 2 Atlanten, aus denen das Gaußwerk bestehen wird, sind die meisten vollendet und das wenige, was noch fehlt, geht einem nahen Abschluß entgegen. So mag ein Eingehen auf die Expedition auch an dieser Stelle gerechtfertigt sein, und es seien dazu die Ergebnisse ihrer ozeanographischen Forschungen gewählt, weil sich in diesen die Arbeiten aller Teilnehmer zusammenfanden, soweit sie auch sonst auseinandergelangen mochten.

Wie wir heute wissen, liegt der Südpol auf Land, und um ihn herum ein Kontinent von rund 14 Millionen qkm Größe, wie sie auch H. WAGNER in kritischer Sichtung der verschiedenen Arealbewertungen annimmt. Der Saum (Schelf) des Kontinents ist von einem flachen Meer überflutet, dessen Boden etwas tiefer als sonst auf den Schelfen herabsinkt, nämlich bis 400, auch bis 600 m. Dann folgt das Böschungsmeer und die Tiefsee, die schon zur Subantarktis gehören, weil sie sich physisch und biologisch von dem Meer über dem Schelfe wesentlich unterscheiden. Also nur der Kontinent bis zum äußeren Rande des Schelfs ist antarktisch, so daß es müßig ist, ihn mit besonderem Namen aus der Antarktis herausheben zu wollen, da er sich mit ihr deckt. Nur er hat die volle Herrschaft des Eises, wie sie auf dem Lande im Inlandeis und seinen Werken und im Wasser in der Homothermie und Homohalinität, auch in der Organismenwelt des Schelfmeeres zum Ausdruck kommt; das ist alles wesentlich anders als im Böschungsmeer und in der Tiefsee, in welchen der Einfluß des Eises nicht mehr herrschend, sondern nun auf zwei Tiefenzonen beschränkt ist, nämlich auf die oberen Lagen und auf das Bodenwasser.

Unter der Oberfläche ist nördlich vom Schelfmeer, in dem sich festliegende und treibende Schollen und Eisberge mengen, zunächst ein Gürtel, in dem sich diese beiden Eisarten dauernd bewegen. Er reicht nach Norden bis zu einer Grenze, die man gewöhnlich als die des geschlossenen Packeises bezeichnet. Freilich finden sich auch südlich von ihr immer Waken und Rinnen, so daß

man ohne die Gefahr der dauernden Festlegung dort fahren kann, besonders an bestimmten bevorzugten Stellen, doch man muß dabei mit zeitweiligen Hemmungen rechnen, da jeder Wind das Eis zusammentreibt, so daß es sich tagelang schließt. Es kommt dann aber nicht überall zu Packungen; im Weddellmeer ist es der Fall, doch südlich von Kerguelen nicht, weil es hier an stauenden Landgrenzen fehlt. Die äußere Grenze dieses Treibeisgürtels gegen den Ozean fanden wir aber ziemlich geschlossen und in derselben Region, in der in der Tiefe die Grenze zwischen Böschung und Tiefseeboden anzusetzen ist, so daß der Treibeisgürtel die Oberfläche des Böschungsmeeeres umfaßt.

Der Einfluß des Eises ist hier nur noch in 2 Tiefenzonen erkennbar, nämlich in den obersten 200–300 m und in der mächtigen Bodenschicht; dazwischen liegt wärmeres Wasser von höherem Salzgehalt wie oben, und nahezu dem gleichen wie im Bodenwasser. Nach dessen Temperatur und Salzgehalt muß man annehmen, daß es aus niederen Breiten kommt; es dringt bis zum Schelfrande vor, doch nicht weiter und trennt die beiden kälteren Schichten darüber und darunter. So entsteht die bekannte Mesothermie der höheren südlichen Breiten, ähnlich wie im nördlichen Eismeer durch den Golfstrom.

In den oberen Lagen darüber breitet sich das Wasser des Schelfmeeres nach Norden aus, denn ihr Salzgehalt ist ebenso wie in diesem, während ihre Temperatur nach Norden allmählich zunimmt. Die Temperatur paßt sich ihrer Umgebung schneller an als der Salzgehalt, wie es auch sonst zu beobachten ist. Die kalten oberen Lagen grenzen in welligen Flächen an die wärmere Zwischenschicht darunter, sind jedoch ganz oben noch zu allen Jahreszeiten von Eisschmelzwasser überlagert, welches nicht tief geht. Sie selbst sind nicht als Schmelzwasser zu bezeichnen, sondern am besten als *das typische Polarwasser*, wie es homotherm und homohalin das ganze Schelfmeer, wieder mit Ausnahme der allerobersten Lagen, erfüllt, und dort den Grenzstand des Ozeans gegen das Inlandeis darstellt.

Die mächtige Bodenschicht entsteht ebenfalls durch die Entwicklung von Schelfmeerwasser nach Norden, ist aber im Gegensatz zu den oberen Lagen nicht mehr rein, sondern mit dem wärmeren Wasser der Zwischenschicht bestimmend gemischt. Denn das Bodenwasser ist kälter als diese und wärmer als das Polarwasser oben. Eine Grenze wie zwischen den beiden letzteren, gibt

es zwischen dem Bodenwasser und der Zwischenschicht nicht. Denn die Temperatur kühlt sich durch diese beiden ganz allmählich nach unten ab und hat am Boden ihr Minimum, und der Salzgehalt bleibt dabei nahezu konstant. Also hat die Mischung das Zwischenwasser nur abgekühlt und dadurch spezifisch schwerer werden und zu Boden sinken lassen, doch seinen Salzgehalt kaum verändert. Deshalb besteht das *Bodenwasser*, das in den Ozeanen bis über den Äquator nach Norden vordringt, im wesentlichen nicht aus

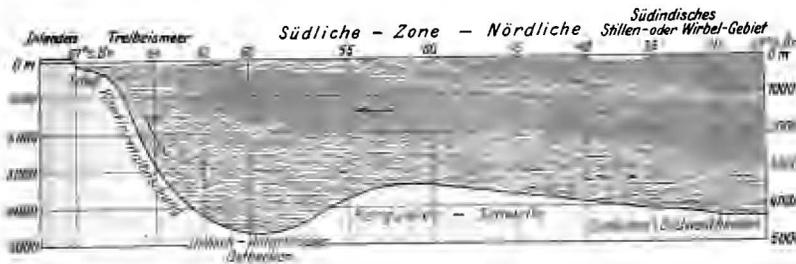
Ich habe an anderer Stelle<sup>1)</sup> ausgeführt, wie es dann westlich von Kerguelen durch einen submarinen vulkanischen Kerguelen-Gaußberg-Rücken nach Süden geleitet wird, und daß hierauf das oft beachtete Zurückweichen der Eisgrenzen um 80° östl. L. nach Süden beruhen kann.

Die Ausbreitung des Polarwassers oben und des Mischwassers am Boden setzt sich nördlich vom Treibeismeer fort. Wir konnten das erstere an und nahe der Oberfläche durch die südliche Zone der Westwindtrift bis über den 55° südl. Br. nach Norden verfolgen, und wir konnten aus Temperatur- und Salz-, doch auch aus Stickstoffanalysen und bakteriellen Untersuchungen feststellen, daß es darauf ziemlich steil zu Tiefen von 900—1000 m absinkt und dann nördlich von Kerguelen langsam weiter sinkend bis über den südlichen Wendekreis kommt. Wir fanden es bei Madagaskar in 1300 m Tiefe, und BRENNER hat seine horizontale Entwicklung auf dem „Planet“ bis gegen 10° südl. Br. verfolgt.

Auch im Atlantischen Ozean ist das Polarwasser in der Breite des Kaps zuerst von der Gauß-Expedition nachgewiesen worden in einem Salzminimum, das wir dort um 1000 m Tiefe fanden. Später ist dieses im atlantischen Gebiet durch W. BRENNER bei der Deutschland-Expedition weiter verfolgt worden und jetzt von A. MERZ und G. WÜST auch in den älteren, früher nicht dahin gedeuteten „Challenger“- und „Gazelle“-messungen erkannt worden. In dieser Ausbreitung des Polarwassers, zuerst an der Oberfläche und von 55° südl. Br. um 1000 m Tiefe, wirkt die Antarktis bis in die niederen Breiten und im Atlantischen Ozean sogar bis zum nördlichen Wendekreis hin. Im Atlantik scheint es nach dem ersten Absinken zu 1000 m in dieser Tiefe auch zu verbleiben, während es im indischen langsam weiter sinkt. Dieses ist aber das einzige antarktische Wasser, das bis in niedere Breiten kommt, während das Bodenwasser der Ozeane, wie gesagt wurde, schon aus den niederen Breiten herrührt und nach der

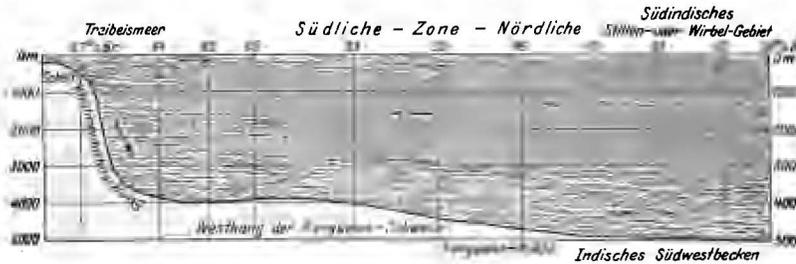
Westwindtrift.

Fig. 1.



Schnitt in westnordwestlicher Richtung östlich vom Gaußberg und Kerguelen bis nordwestlich um St. Paul.

Westwindtrift.



Schnitt in westnordwestlicher Richtung westlich vom Gaußberg und Kerguelen durch die Kerguelenmulde auf Mauritius hin.

Zeichnung der Schnitte nach Mercator-Projektion im Maßstab 1:40 Millionen am Äquator. Tiefen 1:200000, also zweihundertfache Überhöhung.

Oberflächenwasser weiß; Polarwasser gestrichelt; Tropenwasser punktiert; Boden- und Stauwasser gemischt.

*Polarwasser*, sondern aus jenem *Zwischenwasser*, das aus niederen Breiten herkommt; es erhält am antarktischen Schelf nur seine niedrigen Temperaturen. Ich habe diese Verhältnisse in Fig. 1 dargestellt nach einer Tafel, die Herr PATER HOFMANN gezeichnet hat, natürlich nur dem Sinne nach und ohne die Tiefengrenzen im einzelnen verbürgen zu können. Das obere Profil ist östlich, das untere westlich von Kerguelen, das letztere also durch die Kerguelenmulde gezeichnet. Der Vergleich beider bringt zugleich zum Ausdruck, daß das warme Zwischenwasser durch die Kerguelenmulde mächtiger nach Süden vordringt als östlich von Kerguelen, wo es durch die geringeren Tiefen der Kerguelenschwelle gehemmt wird.

Das obere Profil ist östlich, das untere westlich von Kerguelen, das letztere also durch die Kerguelenmulde gezeichnet. Der Vergleich beider bringt zugleich zum Ausdruck, daß das warme Zwischenwasser durch die Kerguelenmulde mächtiger nach Süden vordringt als östlich von Kerguelen, wo es durch die geringeren Tiefen der Kerguelenschwelle gehemmt wird.

<sup>1)</sup> Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss. zu München, math.-naturw. Abt. 1924, Heft 2, S. 157 ff.

Abkühlung am antarktischen Schelf wieder dort hin zurückkehrt. Das Polarwasser wird bei seiner Entwicklung nach Norden wohl wärmer, doch im Salzgehalt nur wenig verändert, da dieser vom Schelfmeer bis zum Äquator noch nicht um 1 ‰ zunimmt.

Das Absinken des Bodenwassers vom Schelfrande und des Polarwassers nördlich von 55° südl. Br. sind verschieden begründet; denn das erstere sinkt, weil es durch Abkühlung schwerer wurde, doch das Polarwasser aus anderem Grund, da seine Temperatur zunimmt und sein Salzgehalt sich nur wenig steigert. Ich möchte annehmen, daß dieser Grund dynamischer Art ist und darin liegt, daß südlich von den Roßbreiten warme Stromäste von Norden her in die Westwindtrift dringen und das Polarwasser zurückstauen. Man merkt das auch daran, daß in der Breite von Kerguelen die Oberflächeneinflüsse des Meeres bis 400 m erkennbar sind, während sie sonst um 100 m verschwinden, also besonders tief. Dort treffen die warmen Stromäste von Norden und kalte von Süden aufeinander und drängen sich gegenseitig zurück, wobei die letzteren als die schwächeren zur Tiefe gedrückt werden. Dabei finden auch Mischungen statt, wie man es aus den starken Temperatur- und Salzschwankungen in dem Staugebiet nachweisen kann, und wie sie besonders südöstlich vom Kap der guten Hoffnung, wo der Agulhasstrom ausläuft, durch SCHOTT und BRENNECKE näher verfolgt wurden.

Im Zusammenhang mit diesen Stauungen und dem Absinken des Polarwassers erhält die Teilung der Westwindtrift in eine nördliche und eine südliche Zone, wie sie von W. MEINARDUS durchgeführt wurde, eine nähere Beleuchtung, da die Grenze zwischen den beiden im Staugebiet liegt; sie scheidet eine südliche Kalt- und eine nördliche Mischwasserzone. Man hat es in der ersteren aber nicht mit Eisschmelzwasser zu tun, wie ich schon hervorhob, sondern mit dem Polarwasser, und in der letzteren nicht mit Warm- sondern mit Mischwasser. In dieser Hinsicht möchte ich die Angaben von MEINARDUS berichten. Denn das typische Schmelzwasser ist an einem mangelnden Ausgleich der konstituierenden Lösungen, also an starken Schwankungen des Salzgehaltes erkennbar, die aber in der südlichen Zone der Westwindtrift fehlen. In ihr ist das Wasser vielmehr das typische Polarwasser, wie es im Schelfmeer entsteht und durch *den vollen Ausgleich zwischen Inlandeis und Meer zu einem Grenzzustande des Ozeanwassers*, ähnlich wie an Küsten oder in Nebenmeeren, charakterisiert werden kann.

Ich darf nun schließlich auch die Ursachen der Bewegungen erörtern, welche die Einflüsse der Antarktis an der Oberfläche oder am Boden bis in niedere Breiten tragen. Nach den neueren Arbeiten von O. PETTERSSON, SANDSTRÖM, HELM-LAND-HANSEN, FORCH, THORADE und besonders WALFRID EKMAN ist es wohl richtig, heute zwei

Arten von Meeresströmungen zu unterscheiden, nämlich Trift- und Konvektionsströme, wobei die ersteren von den Winden oder Windstauungen, die letzteren von Dichteunterschieden herrühren. Jene haben eine mehr lineare, diese eine flächhafte Entwicklung, doch gehen beide ineinander über. Die ersteren nehmen die oberen Lagen der Meere ein, gehen aber in ihrer Weiterentwicklung durch Windstau auch in die Tiefe, diese sind Ausgleichsbewegungen in allen Tiefen, wo Dichteunterschiede vorhanden sind, gehen in der Hauptsache aber auch von der Oberfläche aus, da an ihr die Salz- und Temperatur-, also die Dichtedifferenzen entstehen.

Eine Trennung zwischen den beiden Arten läßt sich noch nicht durchführen, zumal sie sich, wie wir aus den „MICHAEL SARS“- und auch schon „Meteor“-beobachtungen wissen, wohl in allen Tiefen mit Gezeitenströmungen, also mit kosmischen Bewegungen durchdringen. Man dürfte aber in naher Zukunft, ähnlich wie bei den Gezeiten, zu einer harmonischen Analyse der einzelnen Konstituenten der Meeresströmungen kommen. Nur wird man dabei nicht von Druckdifferenzen über stromlosen Flächen ausgehen dürfen, wie es MERZ und WÜST in Anwendung der älteren Anschauungen von H. MOHN versucht haben, da es solche Flächen nicht gibt und die HELMHOLTZschen Wellen auch die Druckverhältnisse wesentlich beeinflussen werden. Wichtig ist aber bei Beurteilung aller Strömungen die Ablenkung durch die Erdrotation, wie sie die Arbeiten W. EKMANS klargestellt haben, und die virtuelle Übertragung auf die Nachbarschichten, wie sie H. THORADE entwickelt.

Wir konnten vor der Küste des antarktischen Kaiser-Wilhelm-II.-Landes feststellen, daß an der Oberfläche neben drehenden Gezeitenströmen Windtriften vorhanden sind, welche sich im Mittel nach Süden gegen die Küste richten. Ich verdanke diese Feststellung der genauen Auswertung unserer Strombeobachtungen durch Dr. K. HESSEN in Wilhelmshaven. Des weiteren ist aus unseren Beobachtungen über treibende Eisberge sowie über die Schiffsbewegungen und die Richtungen des Drahtes beim Loten und Dredgen, auch aus direkten Strommessungen mit dem Zeiger von AIMÉ bis über 300 m Tiefe zu schließen, daß unter den Oberflächentriften ein Tiefenstrom vorhanden ist, der im Schelfmeer westnordwestlich und nahezu parallel zur Küste, dann im Treibeismeer mehr nordwestlich setzt und schließlich mit nördlicher Richtung zu der Westwindtrift umbiegt. Der Stromwirbel, den das Berliner Institut für Meereskunde für jenes Gebiet konstruiert hat, wird durch unsere Beobachtungen, welche die einzigen sind, die dort vorliegen und auch schon längere Zeit veröffentlicht waren, nicht bestätigt. Sie sind bei jener Konstruktion des Instituts übersehen worden.

Diesen Tiefenstrom darf ich in voller Übereinstimmung mit EKMANS Theorie aus dem Wasserstau an der Küste ableiten, welchen die gegen sie

gerichteten Oberflächenströme erzeugen. Er reicht im Schelfmeer bis über 300 m Tiefe; nördlich im Treibeismeer ist er weniger mächtig und grenzt in diesem in einer augenscheinlich welligen Fläche an das warme Zwischenwasser darunter. Er führt das Polarwasser zuerst nach Nordwesten und dann nach Norden und ist der Anfang von dessen großer Entwicklung bis in niedere Breiten, wie ich sie vorher beschrieb. Diese geht also aus einem Wind- und Windstaustrom hervor und dürfte als solcher noch die ganze südliche Zone der Westwindtrift erfüllen. Dann erfolgt das Absinken zur Tiefe infolge des Kampfes der entgegengerichteten Stromäste, die im wesentlichen ja ebenfalls Windtriften sind. Erst danach, also um 1000 m Tiefe, geht die Entwicklung in konvektive Bewegungen über, die man dort aus einem Dichtegefälle auch verstehen kann. Also gehen die vom Wind erzeugten Triften im Polarmeer kaum bis 400 m Tiefe und sind sicher bei 1000 m in konvektive Bewegungen übergegangen.

Bei dem Bodenstrom kommen die Winde nur im Beginn in Betracht, nämlich so weit, als sie und der Stau an der Küste, den sie erzeugen, das Schelfmeerwasser dem warmen Zwischenwasser entgentreiben und mit ihm mischen, so daß es kälter und schwerer wird und zu Boden sinkt. Das Absinken ist schon ein konvektiver Vorgang, und ebenso die weitere Ausbreitung an den Ozeanböden bis in niedere Breiten, soweit man sie kennt. Man kann die konvektive Natur des Bodenstroms schon daraus folgern, daß er solche Erhebungszonen wie den Walfischrücken oder SCHOTTS atlantisch-indischen Rücken mit seinen tiefsten Lagen gar nicht oder nur teilweise überschreitet, wie die Bodentemperaturen des südafrikanischen Beckens und der Kapmulde erkennen lassen. Er erweist sich dadurch als Gefällestrom und ist wohl auch immer als solcher aufgefaßt worden. Da der Polarwasserstrom schon bei 1000 m Tiefe nicht mehr Windstrom ist, kann es ja der Bodenstrom noch weniger sein. Man kann ihn am besten mit dem Ausgleich zwischen einem Maximum und einem Minimum in der Atmosphäre vergleichen.

Die Bewegung des warmen Zwischenwassers bis zum antarktischen Schelfrand hin ist noch nicht völlig geklärt. Wir schließen aus seiner Temperatur und seinem Salzgehalt, daß es aus niederen Breiten herkommt, doch seine Bahnen kennen wir nicht. Die Beobachtungen BRENNECKES und die späteren Analysen von MERZ und WÜST, haben freilich im atlantischen Gebiet unter dem Polarwasser wieder ein wärmeres und salzreicheres Wasser erkennen lassen, in dem sie einen nordatlantischen Tiefenstrom annehmen, der aus den nördlichen Roßbreiten nach Süden setzt. Auch

in den atlantischen Arbeiten des „Gauß“ liegen Anzeichen dafür vor. Er würde seiner Tiefenlage nach das warme Zwischenwasser der höheren südlichen Breiten erklären können, doch der Zusammenhang zwischen beiden ist noch nicht gefunden, und BRENNECKE glaubt ihn für das atlantische Gebiet sogar ablehnen zu müssen. Hier können nur weitere Beobachtungen entscheiden, die wir vielleicht vom Meteor erhoffen dürfen, wenn er weit genug nach Süden, nämlich bis in die südliche Zone der Westwindtrift, geht. Er könnte dort ein fundamentales Problem fördern.

Ich habe das warme Zwischenwasser der höheren südlichen Breiten einstweilen als *Tropenwasser* bezeichnet, ohne seine genaue Herkunft damit angeben zu wollen. Es ist wahrscheinlicher, daß es in den Subtropen zur Tiefe geht, doch seine Wärme würde auch dann aus den Tropen stammen. Für diese Herkunft sprechen auch gewisse Jahreschwankungen, die wir in ihm gefunden. Denn während es gewöhnlich außerhalb des Schelfmeeres endigte, sandte es im Februar, also im Hochsommer der südlichen Hemisphäre, schwache Wärmewellen in der Tiefe bis in dieses hinein. Wir haben sie vor allem biologisch, nämlich an einer katastrophalen Entfaltung der Organismenwelt und weniger physisch feststellen können, wie es auch in einer Dissertation von Fräulein Dr. M. KAEMPF kürzlich dargelegt wurde. Das erfolgte zu der gleichen Zeit, wenn sich auch die Windtriften der Oberfläche mit dem Sonnengange nach Süden verschieben, so daß man für die Schwankungen des Zwischenwassers in der Tiefe, wie für die der Oberfläche wohl die gleiche tropische Herkunft annehmen darf.

So muß ich nach allem den Einfluß der Antarktis auf den Ozean für beschränkter halten, als man ihn wohl sonst, besonders im Bodenstrom, annehmen wollte. Denn die primären Kraftquellen dieses sind in den Tropen zu suchen, wo ja Bewegung und Leben jeder Art in Fülle entsteht, während es in der Antarktis erstarrt. Und wenn die Antarktis auch gerade wegen ihrer Erstarrung und wegen der Bindung der Natur und des Lebens darin zu einer geschlossenen Einheit den Menschengest mit den gewaltigsten und zwingendsten Eindrücken erfüllt, deren er fähig ist, weil man dort in Ruhe oder in langsamer Entwicklung sieht, was in den anderen Erdräumen schnell vorüberhastet, so kommt man doch zur weiteren Erkenntnis der Erscheinungen immer erst, wenn sie sich aus der Erstarrung lösen. Dann können auch manche Betrachtungen keimen, die in der Antarktis entstanden, gleichwie der Ozean für seine Bewegungen und sein Leben am Eise wohl manchen Antrieb, aber nicht die leitenden Impulse erhält.