

EUSTATISCHE BEWEGUNGEN DES MEERESSPIEGELS WÄHREND DER EISZEIT

Von ALBRECHT PENCK

Kaum hatte Louis Agassiz der Lehre von der Eiszeit festere Gestalt gegeben, als schon eine wichtige Folgerung gezogen wurde. Bereits 1842 sprach C. Maclarens aus, daß durch die Bildung ausgedehnter Vergletscherungen eine allgemeine Senkung des Meeresspiegels bewirkt worden sein müsse, die er auf 350—700 englische Fuß schätzte. Der Gedanke ist seither öfters erörtert worden. Aber weit gehen die errechneten Werte auseinander. Das hat seinen Grund in zwiefacher Hinsicht. Noch sind nicht alle Gebiete genauer bekannt, die eine eiszeitliche Vergletscherung erfahren haben, und große Unsicherheit herrscht über deren Mächtigkeit. Der ausgezeichnete finnländische Geologe Wilhelm Ramsay hat in einer hinterlassenen Arbeit¹⁾ das Problem neuerlich angeschnitten und zum ersten Male allseitig erörtert. Des Russischen mächtig, hat er die neueren Arbeiten würdigen können, die eine ausgedehnte mit der nordeuropäischen zusammenhängende Vergletscherung des nördlichen Sibiriens erweisen, so daß wir nun im Nordwesten Eurasiens mit einer Vereisung von 13 Mill. qkm rechnen können. Sie steht also nicht gerade weit hinter der Nord-Amerikas zurück (16,75 Mill. qkm), welche durch die Baffins Bai und Davis-Straße von der Grönlands getrennt war. Letztere ging nicht weit über die große Insel hinaus, vielleicht veranschlagte sie Ramsay mit 2,966 Mill. qkm etwas zu groß. Auch Antarktika war wegen des umgebenden tiefen Meeres nicht viel ausgedehnt vereist als heute, nämlich zu 14,5 Mill. qkm. Ausgedehnt war die Vergletscherung von Patagonien und der westantarktischen Inseln sowie der Falklandsinseln (1,4 Mill. qkm). Das eiszeitlich vergletschert gewesene Gebiet der übrigen gemäßigten Zonen und der Tropen schätzt Ramsay auf rund 3 Mill. qkm, das Ost-Sibiriens auf 3,2 Mill. qkm. Insgesamt also ergibt sich für die eiszeitliche Vergletscherung eine Fläche von 55 Mill. qkm. Demgegenüber mißt die heute vergletscherte Fläche nur 15 Mill. qkm, wovon nicht weniger als 13 auf Antarktika und 1,9 auf Grönland entfallen.

Die letzteren beiden Gebiete geben einen Anhalt für die Oberflächengestaltung großer Inlandeismassen, wie solche während der Eiszeit auch über Nord-Eurasien und Nord-Amerika gebreitet waren. Es sind sanft gewölbte Eiskuchen mit steilem Rande, mit Oberflächen, ähnlich denen zäher Flüssigkeiten, z. B. von Pech oder Asphalt. Das ist für Grönland erwiesen, für Antarktika höchst wahrscheinlich, selbst wenn wir auf Grund der Byrdschen Expedition annehmen, daß sich das Barriere-Eis in einem breiten Kanal zwischen Ost- und Westantarktika hindurchzieht. Aber Ramsay überschätzt die Mächtigkeiten der eis-

1) Changes of Sea-Level resulting from the Increase and Decrease of Glaciations, Fennia 52. 5 1930.

zeitlichen Inlandeismassen, wenn er sie für Eurasien zu 2927 m, für Grönland zu 2140 m, für das östliche Nord-Amerika zu 2886 m, für Antarktika zu 2256 m annimmt und ein Volumen von 134 Mill. cbkm für die Gesamtheit der eiszeitlichen Vergletscherungen errechnet. Dem widerspricht eine Erfahrung aus der Gegenwart. Die Höhe der Inlandeismassen wächst nicht mit ihrer Ausdehnung; sie wölben sich im kleineren Grönland so hoch wie im größeren Antarktika. Wir kennen heute weder aus Antarktika noch aus Grönland noch von den eiszeitlichen Alpengletschern eine Eismächtigkeit von mehr als 2700 m. Nun ist die Vergletscherung Antarktikas von ähnlichen Maßen wie die großen eiszeitlichen der Nordhemisphäre, und wollen wir den letzteren eine größte Eismächtigkeit von 3000 m zuschreiben, so wäre die mittlere Eismächtigkeit bei Annahme einer paraboloidähnlichen Form nur 1500 m. Zu einem kleineren Werte kommen wir, wenn wir von dem wenigen ausgehen, das wir über das Oberflächengefälle der nordeuropäischen Vereisung errechnen können. Sie frachtete baltische Feuersteine zum Rande der deutschen Mittelgebirge bis rund 400 m in die Höhe. Das ist nur denkbar, wenn ihre Oberfläche sich vom baltischen Gebiet um mindestens ebensoviel dahin senkte, wenn sie also über der südlichen Ostsee, sagen wir, rund 1000—1500 m hoch stand. Sie frachtete ferner Granite vom jemtländischen Flachlande auf die Höhe des Åreskjutan, mehr als 1000 m in die Höhe, woraus wir wiederum schließen, daß ihre Oberfläche sich dahin um ebensoviel senkte. Mit 3000 m Höhe überschätzen wir zweifellos ihre größte Höhe unter 65°; setzen wir sie im mittleren Schweden unter 60° zu 2000—2500 m an, so erhalten wir für die mittlere Höhe der Inlandeisoberfläche 1140—1470 m Höhe. Aber das ist mehr als ihre Mächtigkeit. Denn das Inlandeis war auf dem Lande zur Entwicklung gekommen, und drückte es durch seine Last auch dasselbe im mittleren und nördlichen Schweden sowie in Finnland bis unter dem Meeresspiegel herab, so lag seine Sohle doch auch bei seinem Schwinden in den Kjölen, in Nord-Deutschland und Rußland darüber. Die Mächtigkeit des nordischen Inlandeises kann sich daher nur zwischen 1000 und 1300 m bewegt haben.

Ramsay legt großes Gewicht auf die isostatische Eindrückung der Inlandeismassen, und was er in dieser Hinsicht über Grönland schreibt, mutet wie eine Prophezeiung der durch die deutsche Grönlandexpedition Alfred Wegeners erzielten Ergebnisse an. Aber wir verstehen nicht recht, warum er den mutmaßlichen Betrag dieser Eindrückung abzieht vom Volumen der Vergletscherung. Er ist doch in demselben inbegriffen, von uns bei Berücksichtigung der Eissohle in Rechnung gesetzt. Dagegen müssen wir das Volumen der jetzt noch bestehenden Vergletscherungen vom Volumen der eiszeitlichen abziehen, wenn wir erfahren wollen, wie viel Wasser seither dem Meere zurückgegeben worden ist. Die heute noch bestehende Vergletscherung schätzt Ramsay auf 22,5 Mill. cbkm. Dabei spielt die von Antarktika mit 19,5 Mill. und die von Grönland mit 2,62 cbkm (beide Zahlen nach Meinardus) die Hauptrolle. Diese Eismasse entspricht einer Wassermenge von rund 20 Mill. cbkm; werden diese letzteren dem Weltmeere zurückgegeben, so schwilkt dessen Spiegel um 55 m an.

Es ist klar, daß in interglazialen Perioden, wenn alle großen, auch die gegenwärtig vorhandenen Vergletscherungen geschmolzen waren, das Meer höher, in glazialen Perioden tiefer gestanden haben muß als heute. Mit Recht betont

Ramsay, daß an den Küsten die Flüsse während der Zwischeneiszeiten aufschütten und dann in den Glazialzeiten erodieren müssen. Wir haben hier also genau das Gegenteil von dem zu gewärtigen, was wir am Saume der alten Vergletscherungen beobachten, wo die Flüsse in den Glazialzeiten aufschütteten und in den Interglazialzeiten einschnitten. Die Flußterrassen Nord-Frankreichs dürfen wir nicht mit denen des deutschen Alpenvorlandes in eine Linie rücken. Auch müssen wir uns mit Ramsay vergegenwärtigen, daß die Wohnstätten eiszeitlicher Küstenbewohner heute unter Wasser stehen; die Abfallhaufen oder Kjökenmöddinger von Muschellessern der Eiszeit sind unseren Blicken entzogen, sofern sie nicht durch Krustenbewegungen emporgehoben worden sind. Letztere können das Bild der eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels stören. Dies erörtert Ramsay durch seine Würdigung der Uferlinien des Mittelmeeres, welche französische Geologen auf eustatische Bewegungen zurückführen. Er weist daraufhin, daß die höheren, älteren in ihrer Fauna nordische, die tieferen, jüngeren südliche Gäste bergen, jene haben also einen glazialen, diese einen interglazialen faunistischen Einschlag. Nur sie können also mit einer eustatischen interglazialen Senkung in Zusammenhang gebracht werden, die ersten sind durch orogenetische Bewegungen in ihre heutige Lage gebracht worden. Sie liegen im Gebiete jugendlicher Hebungen, wie solche kürzlich von Herbert Lembke¹⁾ durch seine Untersuchungen am Aspromonte festgestellt worden sind. Auch mit isostatischen Bewegungen können die eustatischen interferieren: wenn das von der Eislast befreite Land aufsteigt und das auf ihm gelagerte Wasser dem Meere zurückgibt, dann kann dessen Spiegel gelegentlich rascher ansteigen, als das Land sich hebt, und dessen Hebung wird scheinbar durch eine Senkung unterbrochen. Das hat Ramsay in einer früheren Arbeit für manche nordische Vorkommnisse dargetan.²⁾

Nur im Bereich stabiler Krustenteile kann man gewärtigen, die großen eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels während des Eiszeitalters rein zu erkennen. Die Gebiete der ehemaligen Vergletscherungen mit isostatischen Bewegungen kommen dafür nicht in Betracht, ebensowenig die Gebiete orogenetischer Unruhe. Deshalb scheidet die Westküste beider Amerika aus, die auf große Strecken jung gehobene Schichten aufweist, deswegen auch die Insulinde mit ihrem jähnen Wechsel gehobener und gesenkter Gebiete, deswegen auch die Mittelmeerländer. Vergebens wird man an den dalmatischen Küsten nach jenen eustatischen Terrassen suchen, die de Lamothe von Algier, Gignoux von Unter-Italien, Depéret von Süd-Frankreich beschrieben haben, und sich hüten, die Auswirkungen solcher oft mehr gemutmaßten als erwiesenen Hochstände des Meeres in den Terrassen längs der Flüsse zu erkennen. Wenn Negris von einer quartären Regression des Meeres in Griechenland gesprochen hat³⁾, so hat er meist junge Hebungen im Auge. Im Bereich alter Massive können wir am

1) Beitrag zur Geomorphologie des Aspromonte (Kalabrien). Zeitschrift für Geomorphologie, VI. 1931. S. 58. Dissertation Berlin 1931.

2) On relations between Crustal Movements and Variations of Sea-level during the late quaternary time especially in Fennoscandia. Bulletin Commission géologique de Finlande. Nr. 66, 1924.

3) La régression quaternaire. Athènes 1917.

hesten eustatische Uferlinien aus Interglazialzeiten gewärtigen. Freilich der Nachweis ist nicht leicht, denn auf die interglaziale Anschwellung des Meeres ist ein glaziales Absinken gefolgt, in Folge dessen sind die interglazialen Uferlinien manchmal bis zur Unkenntlichkeit zerschnitten worden. Wir werden sie am wenigsten verletzt dort vorfinden, wo die Küstenablagerungen nicht, wie in der Regel, aus lockerem Gesteine, aus Sand, Ton oder Geröll, sondern aus festem Gestein bestehen, also im Bereiche riffbauender Korallen.

Viele tropischen Küsten sind von gehobenen Korallenriffen von mäßiger Höhe begleitet. So auch Ost-Afrika. Bei Mombassa grenzt ein altes, gehobenes Riff mit einem steilen Kliff ans Meer; davor liegt eine Schorre, die in das alte, tote Riff eingeschnitten ist. In letzteres erstreckt sich die Bucht von Kilindini als ein ertrunkenes Tal. Ausgedehnte Ausbisse an ihren Flanken zeigen, daß das Riff aus zwei verschiedenen Korallenbauten besteht, von einander getrennt durch eine Verwitterungszone, die tiefe Orgeln in ihr Liegendas einsenkt. Zweimal stand das Meer höher als heute, und während dem erfolgten Riffbauten. In der Zwischenzeit lag sein Spiegel tiefer, und das untere Riff erfuhr die gewöhnliche Karstverwitterung. Später tauchten die beiden über einander gelagerten Riffe wieder auf und wurden von einem Tale zerschnitten. Dann stieg das Meer wieder an; das Tal ertrank und wurde zu einer tiefen Bucht. Angesichts dieser wiederholten Schwankungen der Uferlinie habe ich 1912 die Frage aufgeworfen, ob sie auf einen mehrfachen Wechsel von Hebungen und Senkungen des Festen oder auf Bewegungen des Meeresspiegels zurückzuführen seien¹⁾; heute hege ich keine Zweifel mehr und erblicke in ihnen die Auswirkungen von Niveauänderungen des Eiszeitalters. Die alten Riffe sind Bildungen interglazialer Hochstände, die Verwitterungsgebilde und der Einschnitt des Tales von Kilindini Wirkungen glazialer Tiefstände des Meeres, die Verwandlung des Tales in die schöne Bucht ist das Ergebnis der spät- und postglazialen Anschwellung des Ozeans, die begleitet ist von einer rezenten Riffbildung am Rande der Schorre.²⁾ Möglicherweise kann eine eingehende Untersuchung der Fauna in den beiden Riffen eine Stütze für deren angenommenes interglaziales Alter ergeben. Was ich bei einem flüchtigen Besuche sammeln konnte, genügt lediglich, das quartäre Alter des oberen festzustellen.

Dem Wesen nach ähnliche, der Art nach abweichende Verhältnisse sind seither durch Robert W. Sayles³⁾ auf den Bermudas festgestellt worden. Diese Inseln bestehen der Hauptsache nach aus verfestigten Dünensanden, von Sayles Eolianite genannt. Die Bildung solcher Dünensande geschieht gegenwärtig nicht mehr, sie erheischt größere Strandflächen, die heute fehlen, aber bei einer tieferen Lage der Strandlinie im Bereich der Inseln sich entwickeln könnten.

1) Hebungen und Senkungen. Himmel und Erde XXV, 1912, S. 1 (70).

2) In diesem Wechsel von Hebungs- und Senkungsscheinungen liegt für mich der Grund, an eustatische Schwankungen des Meeresspiegels zu denken, die sich allerdings, wie allenthalben auf der Erdoberfläche, mit Krustenbewegungen paart. Letzteren zufolge tauchen die gehobenen Riffe von Mombassa nach N unter. Vgl. J. W. Gregory, Raised beaches and variations of sea-level. Sientia 1931. S. 95.

3) Bermuda during the Ice Age. Proceed. American Academy of Arts and Sciences. 66. 1931. S. 381.

Sayles hält demgemäß die Eolianite für Gebilde von Eiszeiten, während welcher der Meeresspiegel tiefer liegen mußte. Eingeschaltet in die Eolianite sind Lagen von Verwitterungsböden, welche anzeigen, daß die Zeiten der Anhäufung von Dünensanden unterbrochen waren durch Zeiten der Verwitterung. Die Gegenwart ist eine solche Zeit der Verwitterung, und Sayles schließt, daß die Verwitterungsböden ähnliche Zustände anzeigen, wie sie gegenwärtig herrschen und in Interglazialzeiten entstanden sind. Gestützt wird diese Deutung durch die Tatsachen, daß dem älteren Verwitterungsboden marine Kalksteine eingeschaltet sind, die bis 8 m über den heutigen Meeresspiegel reichen. Wir haben also auf den Bermudas einen ähnlichen Wechsel von Hoch- und Tiefständen des Meeres, wie bei Mombassa, und es sprechen gute Gründe dafür, diesen Wechsel mit dem von Glazial- und Interglazialzeiten in Verbindung zu bringen.

Die eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels mußten auch die Korallenbauten des offenen Ozeans beeinflussen. Sank er, so kamen diese über Wasser und starben ab, hob er sich entsprechend langsam, so konnten sie ihm folgen. Nun zeigt sich, daß die Tiefe der Lagunen in den Atollen sich in viel engeren Grenzen bewegen, als man nach der Darwin-Danaschen Senkungstheorie mutmaßen sollte; sie übersteigt nämlich nicht 100 m. Diese Tatsache brachte mich auf die Mutmaßung, daß die ungefähre Lage des Meeresspiegels während einer Eiszeit anzogte, bis zu welchem herab Inselpfeiler durch die Tätigkeit der Brandung gänzlich gekappt worden seien.¹⁾ Den gleichen Gedanken hat Reginald A. Daly²⁾ eingehender begründet und weiter ausgebaut. Er hat ihn besonders durch die Erwägung gestützt, daß bei einer Temperaturerniedrigung der Erde die tropischen Wasser weithin unter die Minimaltemperatur des Korallenwachstums abgekühlt gewesen sein müßten, so daß die Riffe abstarben und deswegen leicht der Brandung erlagen. Diese arbeitet anders als Erosion und Denudation, die auf Kalk langsam fortschreiten, während poröser Korallenkalk leicht den Wogen erliegt. Deswegen konnten interglaziale Koralleninseln während einer eiszeitlichen Senkung des Meeresspiegels durch die Brandung glatt abgeschnitten werden, so daß eine Plattform für spätere, interglaziale oder postglaziale Bauten geschaffen wurde. In scharfsinniger Weise hat Daly seine glaziale Kontrolltheorie der Korallenbauten entwickelt; sie macht die Annahme einer allgemeinen Senkung des pazifischen Ozeans unnötig, welche W. M. Davis kürzlich noch aus den Senkungerscheinungen an den höheren Inseln des Ozeans glaubte erschließen zu können. Alle jene Senkungerscheinungen spielen sich in dem engen Rahmen ab, welchen eine postglaziale eustatische Bewegung des Meeresspiegels gestattet. Damit ist nicht ausgeschlossen, daß bei langsamer Senkung eines Inselpfeilers sich Riff auf Riff baut, wie es Darwin und Dana verlangen. Das Bohrloch von Funafuti erweist dies durch die große Mächtigkeit des erschlossenen Korallenkalkes, der, wie ich mich selbst an den Proben überzeugen konnte, bis zur erreichten größten Tiefe als solcher kenntlich ist, wenn auch die einzelnen Korallen der Art nach nicht mehr bestimmbar sind. Ferner bekundet die außerordentliche Steilheit des Abfalls mancher Koralleninseln,

1) Morphologie der Erdoberfläche. 1894, 2. S. 660.

2) The glacial control theory of Coral Reefs. Proceed. American Academy of Arts and Sciences. 51. 1915. S. 157.

daß sie bis in große Tiefen aus festem Material bestehen, wie es durch den Riffbau geliefert wird. Wir haben also sicher Koralleninseln, die bei Senkungen emporgewachsen sind, wie es Darwin und Dana annehmen; aber diese Senkungen können auch orogenetischer Art sein, erweisen also nicht eine epirogenetische Senkung des ganzen Ozeans, wie man aus Wallriffen und Atollen erschloß. Letztere erklären sich wegen der Begrenztheit ihres Ausmaßes durch die ange deutete eustatische Bewegung des Meeresspiegels. Diese kann nach den zahlreichen Angaben Dalys 100 m nicht überschritten haben. Das heißt, daß vor nicht langer geologischer Vergangenheit — wir nehmen an während einer Eiszeit — 36 Mill. cbkm Wasser weniger im Weltmeer gewesen sind. Sie entsprechen einer Eismenge von 40 Mill. cbkm, welche im Verein mit den 22,2 Mill. cbkm der jetzigen Vergletscherung eine eiszeitliche bilden konnten. Das Volumen einer solchen von 62,2 Mill. cbkm, gebreitet über die Fläche von 54,9 Mill. qkm der eiszeitlichen Vergletscherung ergibt eine durchschnittliche Mächtigkeit derselben von 1,13 km, während sich aus den Werten Ramsays mehr als der doppelte Betrag, nämlich 2,4 km errechnen lassen. Es zeigt sich also auch hier, wie sehr Ramsay die Mächtigkeiten der eiszeitlichen Vergletscherungen überschätzt hat. Dagegen fällt der Betrag, zu dem wir nunmehr für sie gelangen, in die Grenzen dessen, was wir für die eurasiatische Vergletscherung schätzten, nämlich 1000—1300 m. In dieser Übereinstimmung zweier auf ganz verschiedenen Wege erhaltenen Ergebnisse erblicken wir die Gewähr für ihre Richtigkeit und der dabei gemachten Voraussetzungen.

Wenn wir nun versuchen, die erhaltenen Werte für Volumen und Mächtigkeit der eiszeitlichen Vergletscherung auf deren Einzelgebiete unter Zugrundelegung der von Ramsay mitgeteilten Areale zu verteilen, so kann es sich natürlich nur um die Gewinnung bloßer Vorstellungen handeln, die sich im einzelnen nicht näher begründen lassen. Klar ist indes, daß wir für die großen Vergletscherungen des Nordens keinesfalls erheblich größere Eismächtigkeiten als 1 km annehmen dürfen. Aber auch den Vorläufern der beiden noch bestehenden Inlandeismassen können wir nicht nennenswert größere Dicken zuschreiben, als Meinardus, dem Ramsay folgt, für Grönland und Antarktika einsetzt. Dafür wäre kein Wasser bzw. Eis mehr verfügbar. Es kam in beiden Fällen während der Eiszeit im wesentlichen nur zu einer größeren Flächenausdehnung, nicht zu einer Verdickung der Vergletscherung. Das steht im Einklange mit der Tatsache, daß die beiden Inlandeise heute bei sehr verschiedenen Flächeninhalten doch ungefähr gleiche Mächtigkeiten besitzen, daß den Eisdicken gleichsam Grenzen gesetzt sind. Grenzen für die Ausbreitung der Vergletscherungen setzt das tiefere Meer. Die seichte Nordsee konnte von skandinavischem Eise erfüllt werden; an den Tiefen des europäischen Nordmeeres machte letzteres halt. Wir können daher Ramsay nur beipflichten, wenn er die Areale der antarktischen und grönlandischen Vergletscherung während der Eiszeit nicht für ansehnlich größer erachtet, als die der heutigen. Die eiszeitlichen Vergletscherungen spielten sich wie die heutigen auf dem Lande ab, dazu waren die morphologischen Gegebenheiten auf der südlichen Halbkugel während der Eiszeit nur unbedeutend günstiger als für die Gegenwart, während sie auf der Nordhalbkugel in größerem Umfange vorlagen. Daraus erklärt sich, daß während der Eiszeit das Gletscher-

gebiet der Südhalbkugel, das Ramsay mit 15,9 Mill. qkm (vielleicht etwas zu groß) annimmt, nicht einmal halb so groß war, wie das der Nordhalbkugel (39 Mill. qkm), daß im S schätzungsweise 22,7, im N hingegen 39,6 Mill. cbkm Eis lagerten. Gegenwärtig sind die Verhältnisse:

S: Fläche der Vergletscherung. 13,0 Mill. qkm, Volumen 22,18 Mill. cbkm

Während der Eiszeit lagen die Dinge mit den Vergletscherungen auf beiden Halbkugeln genau entgegengesetzt wie heute, wofür wir nur die verschiedene Verteilung von Wasser und Land verantwortlich machen können. Unter den gegenwärtigen klimatischen Verhältnissen begünstigt sie die Eisbildung auf der Südhemisphäre, unter den eiszeitlichen die Nordhemisphäre. Damit streifen wie die Frage, ob wir heute in einer Interglazialperiode leben, oder ob wir noch unter den Nachwirkungen einer Eiszeit leiden. Für Grönland und Antarktika gilt dies sicher; denn der Meeresspiegel hat noch nicht wieder die hohe Lage, welche die alten Korallenriffe von Mombassa anzeigen. Sie kann erst erreicht werden, wenn die beiden großen noch bestehenden Inlandeismassen geschmolzen sein werden. Aber es darf nicht behauptet werden, daß sich heute die Südhemisphäre sozusagen in einer Eiszeit befände, während die Nordhalbkugel eine Interglazialzeit genieße; denn die Herabdrückung der eiszeitlichen Schneegrenze ist im S der Erde, dort, wo wir sie bestimmen können, in Patagonien, auf Tasmanien und Neuseeland nicht geringer als im N. Es läßt sich nur sagen, daß an zwei Stellen der Erde, in Antarktika und in Grönland, der Eisrückzug noch nicht so entschieden wie sonst auf die zur Postglazialzeit führende Klimaänderung reagiert hat.

Damit wird zugleich auch die Frage beantwortet, ob die Eiszeiten, wie es manche Theorien verlangen, abwechselnd die eine oder die andere Halbkugel betroffen haben. Wenn die Vergletscherungen wechselten, wenn die eine eintrat, während die andere zu schwinden begann, waren immer ansehnliche Eismassen an das Land gebunden, und das Weltmeer konnte niemals den Hochstand erreichen den die alten Korallenriffe anzeigen. Diese lehren uns mitsamt den ihnen eingeschalteten Verwitterungsgebilden, daß der Ozean wiederholt höher stand als heute, daß es also wiederholt Zwischeneiszeiten auch für Antarktika und Grönland gegeben hat, in denen beide Halbkugeln von Inlandeislästen befreit waren und nur noch in den hohen Gebirgen Gletscher tragen konnten. Dazwischen schalteten sich Zeiten mit tiefer Lage des Meeresspiegels, verursacht durch die Entwicklung großer Eismassen auf beiden Halbkugeln. Als synchron erweisen sich die Glazial- und Interglazialzeiten des großen Eiszeitalters.

Das ist es, was sich aus den Arbeiten von Ramsay und Daly ergibt. Er-schöpfend haben wir deren Inhalt aber damit nicht wiedergegeben; denn die Er-scheinungen, mit denen sie sich beschäftigen, sind bei aller Großzügigkeit im einzelnen doch recht verwickelt. Zunächst sei darauf hingewiesen, daß die ein-zelnen Vergletscherungen verschieden groß waren, die letzte hält sich in Eur-asien und im mittleren Nord-Amerika in bescheideneren Grenzen, als die größte, und es scheint, als ob von den älteren nicht überall ein- und dieselbe die größte gewesen sei. Deswegen sind die Areale, die Ramsay für die Vergletscherung

angibt, vielleicht für keine ganz zutreffend, und es war die Mächtigkeit der Vergletscherungen deswegen etwas größer als hier errechnet. Nehmen wir an, daß die Tiefe von 100 m, in welcher die ozeanischen Inseln gekappt werden, der letzten Vergletscherung entspricht, so muß dieser eine mittlere Mächtigkeit von mehr als 1240 m zugeschrieben werden, denn sie war über eine Fläche von einigen Mill. qkm weniger gebreitet als die größte. Wenn hingegen zur Zeit der letzten Vergletscherung der Meeresspiegel weniger tief stand, wenn er, wie Sauramo¹⁾ nach Beginn von deren Rückgang für die Yoldiasee errechnet, nur 80 m tief lag, ergeben sich auch für die Mächtigkeit der letzten Vergletscherung 1100 m.

Auf einen weiteren Punkt legen sowohl Ramsay wie auch Daly besonderes Gewicht, nämlich daß in Folge der Vergletscherungen nicht bloß das isostatische Gleichgewicht auf dem Lande, sondern auch auf dem Meere gestört worden sei: welche Störungen auf dem Lande geschehen sind, ergibt sich aus den post-glazialen Hebungen in allen früheren Inlandeisgebieten. Das Eis vermochte der Theorie nach seine Unterlage bis zu einem Drittel seiner eigenen Mächtigkeit einzudrücken, also in unserem Falle bis beinahe 400 m. Ob aber diese Eindrückung wirklich erreicht wurde, ob die Zeit langte, sie zu erzielen, ist die Frage. Der Fortgang der Erhebung in den früheren Inlandeisgebieten zeigt uns an, daß das durch die Eislast gestörte isostatische Gleichgewicht noch nicht wieder hergestellt worden ist, obwohl mindestens 20000 Jahre seit Beginn des Eisrückganges verstrichen sind. Eines hebt sich indes klar hervor, daß das vom Eis weggedrückte Material seiner Unterlage in seiner Umgebung emporgepreßt war, so daß die Vergletscherungen mit einem aufgepreßten Ringe umgeben waren. Daß dies für Grönland heute noch zutrifft, möchten wir aus den Eistieffmessungen der deutschen Grönland-Expedition Alfred Wegeners schließen. Diese aufgepreßten Ringe der alten Inlandeismassen sinken heute ein, wie Daly²⁾ für Nord-Amerika zeigte und wie sich auch für Nord-Deutschland ergibt. War nun während einer Vergletscherung eine 100 m mächtige Wasserschicht dem Ozeane entnommen, so mußte dessen Boden behufs Herstellung des dadurch gestörten isostatischen Gleichgewichts um rund 30 m aufquellen. Das Material dazu lieferte das Land, und wenn wir uns vorstellen dürften, daß völliges isostatisches Gleichgewicht zwischen Ozeanen und Kontinenten geherrscht habe, so waren die letzteren, deren Fläche ja nur 0,4 der ozeanischen mißt, um 75 m gegenüber der letzteren gehoben, und gegenüber einer Landmarke würde der Meeresspiegel um 145 m ($-100 + 30 - 75$) gesenkt gewesen erscheinen. Aber so einfach liegen die Dinge gewiß nicht. Wenn die eisbedeckten Länder sich mit einem aufgepreßten Ringe umgeben, kann sich das unter dem Meere aufgepreßte Material nicht gleichmäßig unter den Kontinenten ausgebreitet haben, und schwer vorstellbar ist, wie diese Auspression überhaupt geschah. Wir wollen

1) Der Anteil der eustatischen Komponente an den Niveauverschiebungen von Fennoskandia. *Fennia* 50. 10. 1928. Antevs hält für die letzte Vergletscherung ein Sinken des Meeresspiegels um 83—93 m für erforderlich. (The last glaciation. Amer. Geogr. Soc., Research Series, N. 17. 1928, S. 81.)

2) Oscillations of level in the belts peripheral to the pleistocene ice-caps. Bull. Geolog. Soc. America. 31, 1920, S. 303.

gleich Ramsay und Daly hierüber keine Spekulationen aufstellen, sondern nur andeuten, daß der eiszeitliche Niveauunterschied zwischen Kontinenten und Meeresspiegel größer war als sich bloß aus der Wasserentnahme aus dem Ozeane ergibt, und nicht bloß ein eustatischer, sondern zugleich auch ein isostatischer war. Für eine Abschätzung des letzteren fehlen uns noch greifbare Anhaltspunkte. Eher können wir die eiszeitlichen Geoiddeformationen in Rechnung ziehen, die ich vor einem halben Jahrhundert arg überschätzt habe; Daly bietet hierfür ebenso wie für elastische Deformationen lehrreiche Berechnungen.¹⁾

Er beschäftigt sich auch mit einer 6 m-Terrasse, die, seitdem er sie 1920 zum ersten Male auf ozeanischen Inseln bemerkt hat, von ihm in weitem Umfange an Küsten namentlich alter Massive gefunden worden ist. Er hält sie für postglazialen Alters und möchte sie nicht später als 1600 v. Chr. ansetzen. Auch Ramsay²⁾ nimmt eine junge Hebung des Meeresspiegels für neolithische Zeit an. Daly ist geneigt, sie auf eine eustatische Bewegung des Meeresspiegels in Folge klimatischer Ursachen zurückzuführen. Viele Anzeichen sprechen für eine postglaziale Wärmeperiode, während welcher die Vergletscherung geringer gewesen und der Meeresspiegel höher gelegen sein kann. Um ihn seither um 6 m durch neuerliches Anwachsen des Eises zu senken, müssen wir indes ein recht ansehnliches Wachstum derselben annehmen, nämlich um 2,4 Mill. cbkm, was für den Fall, daß sich die postglaziale Vergletscherung etwa auf das heutige Gebiet beschränkt haben sollte, einer Mächtigkeitszunahme von 150 m entsprechen würde. Selbst wenn wir annehmen wollten, daß seit dem postglazialen Wärmemaximum das vergletscherte Gebiet um 1 Mill. qkm gewachsen sein sollte, was z. B. durch Erfüllung eines Meeresraumes zwischen Ost- und West-Antarktika geschehen sein könnte, ergibt sich ein Dickenwachstum um 50 m. Größere Wassersammlungen auf dem Landekönnen seit dem postglazialen Wärmemaximum dem Meere keine ansehnlichen Wassermengen entzogen haben, wir haben von ihrer Bildung keine Kunde. Wohl aber können Seen, die während der Eiszeit vorhanden waren, neben den Vergletscherungen zur Senkung des Meeresspiegels beigetragen haben, jedoch kann diese überschlagsweise nur sehr wenige Meter betragen haben. Außerdem können während des Eiszeitalters wie in geologischen Zeiten Krustenbewegungen, welche die Größe der Meeresräume beeinflußten, eustatische Bewegungen des Meeresspiegels verursacht haben; sicher gilt dies von den Hebungen isostatischer Art, welche dem Rückgange des Eises in Nord-Europa und Nord-Amerika folgten und damals vorhandene Meeresteile trocken legten. Aber auch hier ergeben sich, wenn man der Sache rechnerisch näher tritt, nur kleine Beträge. Im großen und ganzen sind die eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels während des Eiszeitalters klimatisch bedingt, sie stellen Schwankungen dar, Schwingungen, wie Daly³⁾ sagt.

Das Ausmaß dieser Schwankungen wird durch Beobachtung geliefert. Die untere Grenze von etwa — 100 m wird geliefert durch die gekappten Inselpfeiler

1) Pleistocene Changes of Level. Am. Journ. of Science 1925, S. 281 (299).

2) Eustatiska nivåförändringar och neolithicum. Ymer 1925, 279. Eustatic changes of level and the neolithicum. Finska Förförminnes föreningens tidskrift. 26, 2. 1926

3) Swinging sealevel of the Ice age. Bull. Geological Society of America 40. 1929, S. 721.

im Ozeane, die obere durch die gehobenen jungen Korallenriffe an den Küsten der alten Massive. Sie ist noch nicht näher verfolgt. Nach den vorliegenden Beobachtungen liegt sie etwa 30 m hoch, rechnerisch ergibt sie sich aus dem Volumen der heutigen Vergletscherung zu 55 m. Der Schwingungsgürtel des Weltmeerspiegels hatte während des Eiszeitalters ein Höhenausmaß von 155 m und einen Flächeninhalt von rund 24 Mill. qkm, das sind 16 v. H., der heutigen Landoberfläche. Fast 14 Mill. qkm sind davon heute vom Meere eingenommen, sie bedeuten einen Verlust für das Leben auf dem Lande für den Menschen. Diesem Verluste steht der Gewinn einer Fläche gegenüber, die vom Eise verlassen worden ist. Er ist erheblich kleiner als jene rund 40 Mill. qkm, um welche die heutige Vergletscherung kleiner ist als die größte eiszeitliche, denn die letztere breitete sich über ausgedehnte Gebiete, die heute dem Meere angehören; man denke nur an Nord- und Ostsee, an den Schelf des nördlichen Eismoores, an Hudsonbai, an St. Lorenzgolf, an den antarktischen Schelf. Die Daten hierüber können wir den Angaben von Ramsay nicht entnehmen; nach einer sehr rohen Schätzung mögen es an 8 Mill. qkm sein. Diese großen geographischen Veränderungen während des Eiszeitalters müssen wir im Auge behalten, wenn wir die heutige Verbreitung des Lebens auf der Erdoberfläche verstehen wollen. Für die Entwicklung der Menschheit ist es wahrscheinlich von Bedeutung gewesen, daß sich ihre Jugend unter steten Schwankungen des Klimas und der Küstenlinie abspielte. Hierauf sei hier nur flüchtig hingewiesen, J. V. Danes hat sich hierzu geäußert.¹⁾ Hier soll nur gezeigt werden, welche Schlüsse sich auf die Mächtigkeit der eiszeitlichen Vergletscherungen auf Grund der von Ramsay ermittelten Areale ergeben. Wenn wir dieselbe im Durchschnitte zu 1100 m ansetzen, so sei ausdrücklich bemerkt, daß diesem Werte namhafte Unsicherheit innewohnt, die wahrscheinlich über die Hundert von Metern herausgeht.

Im folgenden stellen wir die Flächen und Raumhalte der heutigen und der eiszeitlichen Vergletscherungen nach Ramsay sowie der von ihm angenommenen Eismächtigkeiten in abgerundeten Zahlen (R) zusammen und fügen die Volumina und Mächtigkeiten hinzu, die wir nach dem Dargelegten errechnen (P) sowie den entsprechenden Pegelstand. Darunter verstehen wir die Lage des Meeresspiegels, die sich ergibt, wenn die zur Bildung der Vergletscherung erforderliche Wassermenge dem Ozean entnommen (—) oder wieder zugeführt wird (+). Dabei rechnen wir mit einer Meeresfläche von 360 Mill. qkm. Eine Änderung in der Lage des Spiegels um 1 m entspricht dann genau einer Eismenge von 0,4 Mill. cbkm. Die Verengerung des Meeresraumes mit der Tiefe zu berücksichtigen, ist angesichts der Ungenauigkeit aller in Frage kommenden Größen nicht nötig. Tragen wir ihr Rechnung, so war dem Weltmeere bei einer Senkung seines Spiegels um 100 m eine Wassermenge von 34,8 Mill. cbkm entnommen, die zur Bildung von 38,8 Mill. cbkm Eis dienen konnten, also je um 9,5% weniger als angenommen. Um den Betrag von 40 m ist streng genommen die errechnete Eismächtigkeit zu groß. Das können wir nicht zum Ausdruck bringen, wenn wir sie in Hunderten angeben.

1) Pleistocene Changes of Sea-level and the Distribution of Man. Scott. Geogr. Magazine 41. 1925, S. 289.

Albrecht Penk: Eustatische Bewegungen des Meeresspiegels 339

	Fläche Mill. qkm		Eismächtigkeit km		Volumen Mill. cbkm		Pegel- stand m
	R	R	R	P	R	P	
Heutige Gletscher							
Grönland	1,87	1,4			2,62		+ 6,5
Kleinere polare Gletscher	0,19	0,3			0,05		+ 0,0
Außerpolare Gletscher	0,07	0,15			0,01		+ 0,0
Antarktika	18,00	1,5			19,50		+ 48,8
	15,13	1,47			22,18		+ 55,4
Eiszeitliche Gletscher einschließlich der heutigen							
Eurasien	18,0	2,9	1,05	38,0 ¹⁾	13,7		- 34,2
Ost-Sibirien	3,2	1,5	0,8	4,9	2,4		- 6,0
Altai und Ost-Asien	0,6	0,6	0,4	0,8	0,2		- 0,5
Island, Färöer	0,1	0,6	0,5	0,1 ¹⁾	0,0		0,0
Grönland	3,0	2,1	1,4	6,4 ²⁾	4,2		- 10,5
Nordamerika Kordillere	1,0	1,5	0,8	1,5	0,8		- 2,0
Nordamerika Osten	15,7	2,9	1,1	45,4	17,3		- 43,3
Kleinere Gebirge	2,4	0,4	0,4	1,0	1,0		- 2,5
Sa. Nordhemisphäre	39,0	2,5	1,0	97,6	39,6		- 99,0
Patagonien und Nachbarschaft	1,4	1,8	0,7	2,5	1,0		- 2,5
Antarktika	14,5	2,6	1,5	33,1 ²⁾	21,7		- 54,2
Sa. Südhemisphäre	15,9	2,2	1,4	35,6	22,7		- 56,7
Sa. Erdoberfläche	54,9	2,4	1,1	133,9 ²⁾	62,3		- 155,7
Eiszeitliche Gletscher abzüglich der heutigen							
	39,8	2,8	1,0	111,0	40,1	-100,3	

¹⁾ nach Berichtigung eines Rechenfehlers.