



Glaziale Krustenbewegungen.

VON ALBRECHT PENCK.

In allen Gebieten größerer eiszeitlicher Vergletscherungen treffen wir Hebungserscheinungen, welche mit dem Schwinden des Eises einsetzen und vielfach bis in die Gegenwart fortdauern. So regelmäßig sind hier die gehobenen Uferlinien, daß man sie wiederholt auf Schwankungen des Meeresspiegels zurückgeführt hat. An solche habe ich früher¹ ebenso wie JAMES CROLL² und andere gedacht. Sie spielen hier in der Tat auch eine Rolle, aber keine andere als sonst auf der Erdoberfläche, können daher nicht zur Erklärung der gehobenen Strandlinien herangezogen werden. Diese sind, wie GERARD DE GEER³ in Skandinavien und in Nordamerika durch Verfolg der Isobasen gezeigt hat, Folgen einer flachen, schildförmigen Aufbiegung des Landes, die ein viel stärkeres Gefälle der alten Uferlinien verursacht hat, als je durch die Attraktion von Eismassen erklärt werden kann.

Ebenso wie die gehobenen Uferlinien haben auch die in ihrem Bereiche auftretenden noch anhaltenden Hebungserscheinungen häufig an Bewegungen der Wasserhülle denken lassen. Wie energisch dies geschehen ist, hat erst kürzlich A. G. HÖGBOM⁴ wieder gezeigt. Noch im »Antlitz der Erde« spricht EDUARD SUESS⁵ von einer Entleerung der Ostsee, um die dortigen Hebungserscheinungen zu erklären. SIEGER⁶ und ich selbst⁷ haben die Unhaltbarkeit dieser Anschauung dargetan, den exakt geführten Beweis aber für die Hebungen gab erst ROLF WITTING⁸ durch streng systematische Verarbeitung der Pegelbeobachtungen der Jahre 1898—1912. Seine Isobasen der Gegenwart zeigen große Ähnlichkeit mit denen der Postglazialzeit, die nach DE GEERS bahn-

¹ Schwankungen des Meeresspiegels. München 1882. Jahresber. d. geogr. Gesellsch. München VII f. 1880 u. 1881 S. 47.

² Climate and Time. 1875 Cap. XXIV.

³ Om Skandnaviens nivåförändringar under quartärperioden. Geologiska Föreningens Förhandlingar. Stockholm 1888, S. 367. On Pleistocene Changes of Level in Eastern North America. Proceedings Boston Society Natural History XXV, 1892 S. 454.

⁴ Nivåförändringarna i Norden. Göteborgs Kgl. Vetenskaps og Vitterhets-Samhälles Handlingar. 4. F. XXI 3 1920.

⁵ Bd. II S. 524, 700.

⁶ Seenschwankungen und Strandlinienverschiebungen in Skandinavien. Zeitschr. Gesellsch. f. Erdkunde, Berlin 1893, S. 1, 393.

⁷ Morphologie d. Erdoberfläche. II, 1894, S. 536.

⁸ Hafsyttan, geoidytan och landhöjningen utmed baltiska hafvet och vid nordsjön. Fennia 39. 5, Helsingfors 1918.

brechendem Vorgang wiederholt für Skandinavien konstruiert worden sind, und lassen keinen Zweifel darüber, daß die heutige Hebung von Fennoskandia nur die Fortsetzung der nach dem Eisrückzuge begonnenen ist.

Die Beschränkung der letzteren auf das Bereich der eiszeitlichen Vergletscherung führt zur Mutmaßung einer bestimmten Verknüpfung zwischen beiden. v. DRYGALSKI¹ sucht diese in den durch die Eismassen bewirkten Wärmeschwankungen in der Kruste. Aber letztere reichen nicht hin, um quantitativ die Erscheinungen zu erklären, wie RUDZKI gezeigt hat. Letzterer² greift zur Onerartheorie JAMIESONS³ zurück, nach welcher die postglazialen Hebungen im Bereich der alten Gletschergebiete durch deren Entlastung von den auf ihnen gelegenen Eismassen bewirkt worden sind. Ihre Voraussetzung ist nunmehr erwiesen. Es befindet sich die Erdkruste annähernd in einem Zustande des isostatischen Gleichgewichtes; wenn sich derselbe aufrechterhalten soll, so muß sie unter der Last von Inlandeismassen einsinken, und wieder aufsteigen, wenn sie von denselben entlastet wird.

Gleichwohl habe ich lange Zeit gezögert, mich der Theorie JAMIESONS anzuschließen. Die Alpen schienen ihr keine Stütze zu gereichen. Erst durch den Nachweis⁴ glazialer und interglazialer Schwingungen in ihrem Bereiche wurden meine Bedenken zerstreut. Seither bin ich auch durch Revision meiner Beobachtungen über die postglazialen Uferlinien der Alpenseen zur Überzeugung gelangt, daß wir es wahrscheinlich auch in den Alpen mit einer der skandinavischen ähnlichen postglazialen Hebung zu tun haben. Es zeigt sich nämlich, daß in der Regel die Stellen, welche auf einen höheren Wasserstand deuten, am oberen Ende des Sees gelegen sind. So ist es am Würmsee, am Zürichsee und auch am Tegernsee⁵. Wo alte Uferterrassen den ganzen See umgürten, haben sie ihre größte Höhe am oberen Ende des Sees. So ist es am Bodensee. Bereits SIEGER⁶ hat gefunden, daß dessen alte Uferlinien der heutigen nur im ganzen parallel gelegen sind und eine geringe Neigung gegen denselben nicht für ausgeschlossen

¹ Über Bewegungen der Kontinente zur Eiszeit und ihren Zusammenhang mit den Wärmeschwankungen in der Erdrinde. Verhandl. d. achten deutschen Geographentages 1889 S. 162.

² Deformationen der Erde unter der Last der Inlandeises. Bulletin international de l'Académie des Sciences de Cracovie. April 1899. Weitere Untersuchungen, ebenda Nov. 1899, bringen Berichtigungen numerischer Werte. Deformationen der Erde während der Eiszeit. Zeitschr. f. Gletscherkunde I, 1906, S. 182.

³ On the History of the Last Geological Changes in Scotland. Quarterly Journal Geological Society, London XXI, 1865 p. 178. On the Cause of the Depression and the Re-Elevation of the Land during the Glacial Epoch. Geolog. Mag. (2) IX, 1882 S. 400. On some Changes of Level during the Glacial Period and their supposed Cause. Ebenda (3) IV 1887. Der Ausdruck Onerartheorie rührt von REYER her. (Ursache der Deformationen und Gebirgsbildung 1892 S. 7.)

⁴ Die Terrassen des Isartales in den Alpen. Sitzungsberichte der phys.-math. Klasse d. preuß. Akademie d. Wissensch. 1922 S. 182. Ablagerungen und Schichtstörungen der letzten Interglazialzeit in den nördlichen Alpen. Ebenda S. 214.

⁵ Vgl. PENCK und BRÜCKNER. Die Alpen im Eiszeitalter. 1909 S. 339, 526, 173. Daß der Tegernsee ringsum von Marken eines früheren Hochstandes umgeben ist, trifft nicht voll zu; die maßgebenden Vorkommnisse liegen am oberen Teile des Sees und bezeichnen bei der Weißachmühle das Ende der von mir kürzlich erwähnten postglazialen Terrasse des Weißachtals, die auf eine postglaziale Hebung zu deuten scheint. (Siehe Sitzungsberichte 1922 S. 196.)

⁶ Postglaziale Uferlinien des Bodensees. Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees XXI, 1893.

gehalten. Seither ist SCHMIDLE¹ entschieden dafür eingetreten, daß der postglaziale Bodensee nicht Spiegelhöhen von 420 m oder 430 m hatte, sondern nicht höher als 410 m reichte. Das scheint für die Gegend von Konstanz zuzutreffen, wo sich große zusammenhängende Uferlinien in 14 m Höhe über dem See (395 m) finden. Aber höhere Seestände finden sich bei Bregenz², ganz abgesehen von dem ganz hohen bei Farn (570 m) zwischen Rorschach und St. Gallen. Letztere liegen so hoch (175 m) über dem See, daß ich nicht wage, sie zu den postglazialen Uferbildungen des Bodensees zu rechnen und sie als Ablagerungen in einem Stausee an den Flanken des alten Rheingletschers ansehe, der sich im Tale der Goldach erstreckte³. Eine Schrägstellung des postglazialen Bodenseespiegels um 0.2—0.4 ‰, des postglazialen Würmseespiegels von 0,5 ‰ im Alpenvorlande, des postglazialen Tegernseespiegels von 2 ‰ in den Alpen selbst, in jedem Falle mit einem Anstiege gegen das Gebirge, erscheint als durchaus möglich.

Das Gebiet der großen skandinavischen postglazialen Hebung wird im Süden, an den Ufern der Nord- und Ostsee, von einem Gürtel postglazialer Senkungen begrenzt, welche wie eine peripherische Erscheinung entgegnetreten. Sie sind überall dort nachweisbar, wo der Saum des Hebungsgebietes in gut untersuchte Länder und nicht ins Meer oder in den Norden Rußlands fällt. Dieser peripherischen postglazialen Senkung, die auch in Nordamerika wiederkehrt⁴, entsprechen noch heute vonstatten gehende Senkungen und die Grenzen beider gegen das postglaziale und heutige Hebungsgebiet fallen ungefähr zusammen. ROLF WITTING hält die beiden heute vonstatten gehenden Bewegungen für korrelat. Daß in der Tat eine Beziehung zwischen ihnen vorhanden ist und die peripherische Senkung ebenso wie die zentrale Hebung mit der Vereisung zu tun hat, geht daraus hervor, daß sie auch, weiter nach Süden gerückt, durch die marinen Ablagerungen der Eem-Stufe für die vorletzte Interglazialzeit nachweisbar ist⁵. Wir schließen aus diesen gegenwärtigen, postglazialen und interglazialen Senkungen auf vorhergehende glaziale Hebungen in der Peripherie des Gletschergebietes, und halten sie dadurch verursacht, daß dessen Saum am Eisrande durch Gesteinsmassen aufgepreßt wurde, die aus dem Gebiete der glazialen Eindrückung in die Umgebung gedrückt wurden⁶. Natürlich kann es sich hier nur um eine in der Tiefe vonstatten gegangene Versetzung von Materialien der Kruste handeln, entweder um eine bloße Verbreiterung der Unterlage des oberflächlich eingepreßten Krustenteiles, welche die Nachbarschaft aufpreßte, oder

¹ Postglaziale Ablagerungen im nordwestlichen Bodenseegebiet. Neues Jahrbuch f. Mineralogie u. Geologie 1910 II S. 104. Zentralblatt für Mineralogie 1911 S. 112, 255.

² Daß es sich hier um Ablagerungen in glazialen Stauseen handelt, wie WERTH annimmt (Die Uferterrassen des Bodensees. Branca-Festschrift 1914 S. 164), dürfte sich schwer erweisen lassen.

³ Dies Delta ist vielleicht mit dem von HEIM (Geologie der Schweiz I S. 314) aus dem Liegenden der Schieferkohlen von Mörschwyl erwähnten identisch. Es ist postglazial. Ein interglaziales Delta kenne ich in der Gegend nicht.

⁴ E. O. ULRICH. Major Causes of Land and Sea Oscillations. Journal Washington Academy of Sciences X, 1920, S. 57.

⁵ A. PENCK. Die Eem Schwingung. Lorient-Festschrift. Verhandelingen van het Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap voor Nederland en Koloniën. VI. DELFT 1922.

⁶ Mit einer solchen peripherischen Aufpressung rechnet auch KÖPFEN, Das System in den Bodenbewegungen und Klimawechseln der Quartärzeit. Zeitschr. f. Gletscherkunde XII, S. 97, Mai 1922.

um eine Strömung irgendeiner Partie von magmatischer Beschaffenheit in der Kruste. Die Onerartheorie zwingt uns, neben den nachweisbaren Vertikalbewegungen an der Erdoberfläche horizontale Massenversetzungen in der Tiefe anzunehmen, die sehr beträchtliches Ausmaß erhalten können.

Wie groß diese Massenversetzungen in der Tiefe gewesen sind, können wir annähernd für die letzte nordische Vergletscherung schließen. Ihre Grenzen sind uns allerdings nur streckenweise, ihre Mächtigkeit nur schätzungsweise bekannt. Sicher reichte sie in Norddeutschland so weit wie die Seen und Sölle; und weiter gegen Nordosten hat sie gleichfalls mindestens das ostbaltische Seengebiet bis zur Waldaihöhe gedeckt, von wo ihr Saum gegen das Weiße Meer gelaufen sein dürfte. Gegen Westen setzen wir ihn etwa am Abfalle der Flachsee gegen die Tiefsee des Nordmeeres. Weiter südlich zieht er sich durch die zimbriische Halbinsel. Wir erhalten durchweg etwas weitere Grenzen als MUNTHER¹ angibt. Sie umspannen ein Gebiet von 3300000 qkm und haben einen Umfang von 6900 km. Die Eismächtigkeit war so groß, daß das Eis die skandinavischen Hochlande von Osten her überfließen konnte. Sie dürfte im nördlichen Schweden 2000 m betragen haben. Nehmen wir nun an, daß der Eiskörper ähnlich geformt gewesen wie das heutige grönländische oder antarktische Inlandeis, d. h. daß er in seiner Mitte eine sanfte Aufwölbung, also etwa die Gestalt eines Paraboloids hatte, so dürfte seine mittlere Mächtigkeit die Hälfte der größten gewesen sein und 1000 m betragen haben. Sein Volumen war also 3300000 cbkm, und er drückte seine Unterlage durchschnittlich $\frac{1}{3}$ km tief ein, so daß aus ihr 1100000 cbkm Gestein herausgedrückt wurde. Dementsprechend mußten unter jedem Kilometer der Grenze durchschnittlich 159 cbkm Gesteins passieren. Verteilten sich die verdrängten Massen in einem Ringe von rund 500 km Breite um das Gebiet der Vergletscherung, so bewirkten sie hier eine mittlere Aufpressung von rund 150 m.

Eindrückung und Aufpressung sind am Schlusse der letzten Vergletscherung nachweisbar, nicht aber die Beträge, die sie gehabt haben. Wir können lediglich feststellen, welche Gesteinsmassen in das Gebiet der nordischen Vergletscherung zurückgekehrt sind. Dafür bieten die für Fennoskandie entworfenen Karten der postglazialen Isobasen einen Anhalt. Wir benutzen die von MUNTHER für eine Ausmessung, da sie weiter reichen als die von GERARD DE GEER².

Die Ergebnisse der Ausmessung sind mit anderen in unserer Tabelle I niedergelegt und graphisch unter der Karte dargestellt. Es zeigt sich, daß das Gebiet der fennoskandinavischen Hebung mit 2443000 qkm nur $\frac{3}{4}$ der letzten Vergletscherung ausmacht, und daß ihr Volumen von 293900 cbkm nur etwa $\frac{1}{4}$ der mutmaßlich herausgedrückten Gesteinsmassen beträgt. Und während unter jedem Kilometer der Grenze der Vergletscherung 159 cbkm Gestein herausgedrückt sein sollten, sind unter den 6000 km Grenze des Hebungsgebietes auf 1 km nur 49 cbkm Gesteins in dasselbe hineingelangt.

¹ Studies in the late-quaternary History of Southern Sweden. Geologiska föreningens förhandlingar XXXII, Stockholm 1910, S. 1197, Tafel 46.

² Om Skandiniavens geografiska utveckling efter istiden. Stockholm 1896. Tafeln.

Das sind sehr erhebliche Differenzen. Aber die Summe dieses eingewanderten Materials ist entschieden größer als errechnet. Die Hebung des Nordens ist größer, als sich aus den Isobasen ergibt; denn während das Land stieg, hob sich der Meeresspiegel, weil sich die durch das Schmelzen des Inlandeises frei werdenden Wassermassen dem Ozeane beigesellten und weil die Hebung erst von dem Zeitpunkte an wahrnehmbar wird, in dem das Land eisfrei wird, also stellenweise lange nach Beginn der Hebung. Geben wir eine 1000 m mächtige Inlandeisfläche von 3,3 Millionen Quadratkilometer dem Weltmeer zurück, so erhöhen wir dessen Spiegel um 8 m. Nun gab es neben der nordischen Vergletscherung noch eine nordamerikanische; große Eismassen lagen im Norden Asiens, in Patagonien und kleinere an vielen Orten der Erde. Ihr Schmelzen insgesamt dürfte den Meeresspiegel um den fünffachen berechneten Betrag, also auf 40 m erhöht haben. Um diese Beträge ist die Hebung von Skandinavien zu klein berechnet.

Tabelle I.

Areale (A in 1000 qkm) und Volumina (V in 1000 cbkm, v in cbkm) der Isobasenstufen in Fennoskandia.

Postglaziale Hebung		Postglaziale Hebung verbessert		Jährliche Hebung			
	A	V		V	A	v	
0—50 m	612	15.3	0—55 m	16.8	0—2 mm	674	0.7
50—100 m	512	38.4	55—120 m	44.8	2—4 mm	496	1.5
100—150 m	366	45.7	120—200 m	58.6	4—6 mm	290	1.4
150—200 m	473	82.8	200—300 m	118.2	6—8 mm	453	3.2
200—250 m	386	86.8	300—430 m	140.8	8—10 mm	385	3.5
über 250 m	94	24.9	über 430 m	41.5	über 10 mm	140	1.5
Summe . . .	2443	293.9		420.7		2438	11.8

Auch aus der andern angegebenen Ursache fällt der Betrag der Hebung Skandinaviens zu gering aus. Gerade das höchst gehobene nördliche Schweden wurde zuletzt eisfrei, nämlich nach den Untersuchungen von G. DE GEER 5000 Jahre später als das südliche¹. Wenn seither weitere 7000 Jahre verstrichen sind, so liegen in Nordschweden nur $\frac{7}{12}$ der Hebung vor, welche eingetreten ist, seitdem Südschweden eisfrei geworden ist, und der Isobase von 250 m würde eine solche von 430 m entsprechen, falls die Hebung ganz gleichmäßig vonstatten gegangen wäre. In ähnlicher Weise ergäben sich für die Isobase von 200 m: 300 m, für 150: 200 m, für 100 m: 120 m, für 50: 55 m, und die mittlere Erhebung würde 172 m betragen bei einem Volumen von 420700 cbkm. Nun aber entspricht die 0-m-Isobase in Wirklichkeit nicht einer unveränderten Lage des Landes, sondern jenen Orten, an denen die postglaziale Hebung gleich dem Untertauchen war, die das Land

¹ Geochronologie der letzten 12000 Jahre. Geolog. Rundschau III 1912. A Geochronology of the last 12000 years. Comptes Rendus XI. Congrès géologique. Stockholm 1910, S. 241. Om naturhistoriska kartor över den baltiska dalen. Populärnaturvetenskaplig revy. Stockholm 1914, S. 189. Eine Übersicht der von DE GEER angeregten und geförderten Arbeiten und deren Ergebnisse gab ED. BRÜCKNER: Geochronologische Untersuchungen über die Dauer der Postglazialzeit in Schweden, in Finnland und in Nordamerika. Zeitschrift f. Gletscherkunde XII, 1921, S. 39.

infolge der Füllung des Ozeanes durch die Schmelzwasser der Vergletscherungen erfuhr. Wir haben daher obige Zahl noch um 40 m zu erhöhen und erhalten als wahrscheinlichen Betrag der mittleren Hebung Fennoskandias 212 m.

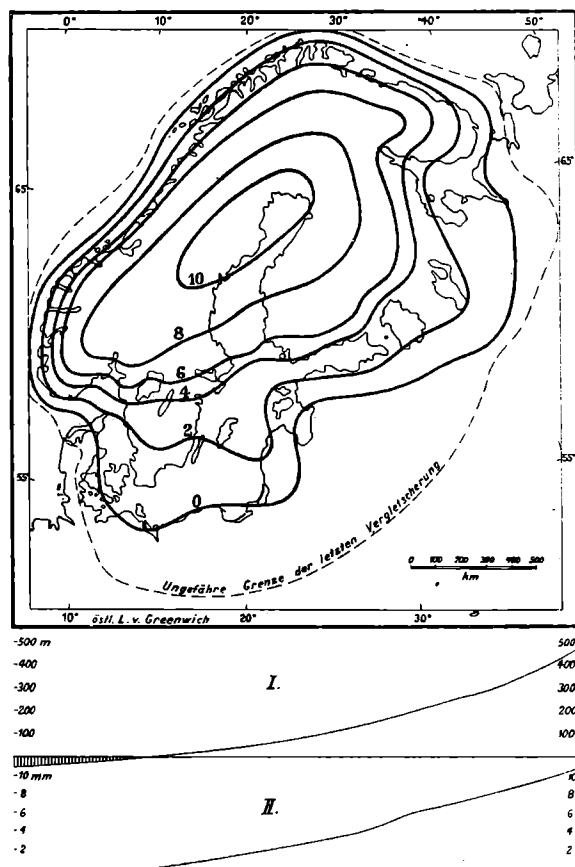
Es fragt sich nun, wo wir die wirkliche Null-Isobase zu suchen haben. Sie liegt gewiß ziemlich weit außerhalb des Gebietes der scheinbaren Null-Isobase, und zwar um so weiter, je größer wir das Areal der vergletschert gewesenen Gebiete und die durch sie bewirkte eiszeitliche Senkung des Meeresspiegels annehmen. Setzen wir diese zu 40 m an, so können wir angesichts der Regel, daß die tieferen Isobasenstufen um so größer werden, je tiefer sie liegen, für das Areal der Hebungsstufe von -40 m bis 0 m (auf den heutigen Meeresspiegel bezogen) etwa ebensogroß veranschlagen wie das der Hebungsstufe von 0 m bis 50 m, nämlich rund 600000 qkm. Es rückt also die wirkliche 0-m-Isobase dicht an die Grenze der Vergletscherung heran, wo man sie theoretisch zu gewärtigen hat, und sie würde mit ihr genau zusammenfallen, wenn wir das Volumen der letzten Vergletscherungen etwas größer veranschlagen als geschehen. Die Differenz zwischen Hebungsgebiet und Vergletscherungsgebiet kommt also nahezu zum Verschwinden. Aber es bleibt noch eine stattliche Differenz zwischen dem herausgedrückten und dem zurückgekehrten Material. Denn wenn wir nun auch das Gesamtgebiet der Vergletscherung um einen Betrag von 210 m gehoben betrachten, so können wir doch nur einen Volumenzuwachs von 693000 cbkm Gestein errechnen, während schätzungsweise aus dem Gletschergebiet 1100000 cbkm herausgewandert sind.

Ein derartiger Unterschied darf nicht überraschen, denn es ist noch nicht alles aus dem Gebiete der Vergletscherung herausgedrückt gewesene Material wieder an seinen Ursprungsort zurückgekehrt. Noch hebt sich Fennoskandia. Erst wenn das aufgehört hat, dürfen wir annehmen, daß die Massengruppierung wieder hergestellt ist, die vor der Vergletscherung bestand. Würde sie heute schon erreicht sein, so könnten wir aus der postglazialen Hebung Fennoskandias einen Schluß auf die mittlere Mächtigkeit der nordischen Vereisung machen können. Sie wäre gleich dem dreifachen Betrage der Hebung, also 630 m. Diese Zahl hat als ein Minimalmaß für die Mächtigkeit der letzten Vergletscherung Nordeuropas zu gelten, und die hypsographische Kurve der Hebung gibt zugleich eine Vorstellung von der hypsographischen Kurve der ihr entsprechenden dreimal höheren Vergletscherung. Die wahrscheinliche Mächtigkeit muß größer sein, und der roh geschätzte Betrag von 1000 m dürfte ihr ziemlich nahe kommen, da, wie dargetan, die wahre Grenze des Hebungsgebietes recht nahe der Grenze der Vergletscherung liegt. Wenn wir erwägen, daß wir beide Grenzen genau zum Zusammenfallen bringen können, wenn wir das Volumen der Vergletscherungen größer veranschlagen als geschehen, erscheint uns die angenommene Eismächtigkeit von 1000 m eher etwas zu klein als zu groß. Mehr als ein Drittel der aus dem Gebiete der Vergletscherungen herausgedrängten Masse sind in dasselbe noch nicht zurückgekehrt.

Über die Schnelligkeit ihrer Rückkehr gibt uns die gegenwärtige Hebung Fennoskandias eine Vorstellung. Die von ROLF WITTING entworfenen Jahres-

isobasen der Gegenwart für das gesamte Ostseegebiet bis in das Kattegat hinein zeigen in ihrem Verlauf einen bemerkenswerten Parallelismus zu den Isobasen der Postglazialzeit. Insbesondere fällt auf, daß die Nulllinien übereinstimmen. Nun stellt das Ostseegebiet einen Sektor der letzten Vergletscherung des Nordens dar. Es erscheint daher möglich, nach den Isobasen der

Postglazialzeit die der Gegenwart zu ziehen und solche für ganz Fennoskandia zu entwerfen. Das ist in nebenstehendem Kärtchen geschehen. Auf ihm sind die Isobasenstufen ausgemessen und damit die Grundlage für eine Kubierung der Hebung gewonnen worden. Die Ergebnisse finden sich auch in Tabelle 1 und graphisch dargestellt unter unserem Kärtchen. Es zeigt sich, daß das Areal der gegenwärtigen Hebung Fennoskandias mit dem der postglazialen beinahe übereinstimmt. Das Volumen der Hebung kommt nahe an 12 cbkm jährlich, ihr mittlerer Betrag ist 4.8 mm im Jahre; auf jedes Meter Grenze des Hebunggebietes strömen alljährlich 1840 cbm innerhalb der Kruste ein. Wäre die Geschwindigkeit der Hebung als konstant anzunehmen, so böte sie uns ein Maß für die Dauer der postglazialen Hebung, und diese ergäbe sich zu 44000 Jahren. Aber jene Geschwindigkeit muß sich im Laufe der Zeit geändert haben. Bei Beginn des Eisrückzuges gleich Null, wuchs sie während desselben und erreichte voraussichtlich ein Maxi-



Karte der Isobasen in mm der Gegenwart in Fennoskandia konstruiert nach ROSE WIRTING. 1:30000000.

I. Hypsographische Kurve der postglazialen Hebung von Fennoskandia nach den verbesserten Isobasen MUNTHERS. Schraffiert: ertrunkenes Hebunggebiet. II. Hypsographische Kurve der gegenwärtigen Hebung von Fennoskandia.

um, als der Eisrückzug beendet und der letzte Rest der Vergletscherung im nördlichen Skandinavien zerfallen war, also nach DE GEERS finiglazialer Zeit. Mit dem Schwinden der Ursache mußte die Hebung nachlassen, aber sie dauert noch, bis das Gleichgewicht wiederhergestellt ist. Diese theoretische Erwägung findet eine Bestätigung durch eine Untersuchung von A. G. HÖGBOM¹ über die Intensität der postglazialen Hebung Schwedens während der letzten

¹ Eine graphische Darstellung der spätquartären Niveauveränderungen Fennoskandias. Bull. Geolog. Institut Upsala XVI S. 169, 1919. Om några anomalier i de postglaciala nivåförändringarna. Geologiska föreningens förhandlingar XLII, 1920, S. 47.

9000 Jahre. Wir entnehmen seiner graphischen Darstellung der Hebung im Angermanland, Hälsingland und im nördlichen Uppland folgende Werte:

Hebung im mittleren Schweden in den letzten 9000 Jahren:

n. Chr.		v. Chr.							Mittel
Jahrtausend		I	II	III	IV	V	VI	VII	
Jahrtausend	II I	I	II	III	IV	V	VI	VII	Mittel
Hebung (Einheiten)	1.0 1.3	2.0	2.6	3.2	3.1	1.5	6.4	13.6	3.9

Herrschte in ganz Fennoskandia derselbe Rhythmus der Hebung wie im nördlichen und mittleren Schweden, so betrug die letztere in den neun Jahrtausenden durchschnittlich im Jahre 18.5 mm, also insgesamt 167 m, ziemlich genau drei Viertel der Gesamthebung von 212 m. Seit Beginn des Gletscher-rückzuges bis zum Jahre 7000 v. Chr. hätte die Hebung danach nur 45 m betragen. Diese Leistung muß sich in mehr als 3000 Jahren vollzogen haben, denn nach DE GEERS Beobachtungen stand der Eisrand vor 12000 Jahren bereits in Schonen. Die mittlere jährliche Hebung muß daher weniger als 15 mm betragen haben. Es bestätigt sich also unsere Annahme, daß die Intensität der Hebung anfänglich geringer war als später.

Es ist aber auch sicher, daß im achten vorchristlichen Jahrtausend die Hebung nicht im entferntesten so stark gewesen sein kann wie im siebenten, in dem sie nach A. HÖGBOM 13.6 Einheiten betragen hat, denn es stehen für die Jahrtausende des Eisrückzuges vor dem siebenten nachchristlichen im ganzen nur 9 Einheiten zur Verfügung. Das siebente Jahrtausend v. Chr. erscheint daher als eine Zeit ganz besonders starker Hebung. Schreiben wir dem achten nur eine ebenso große Hebung zu wie dem sechsten, so bleiben für die vorangegangenen Jahrtausende, deren mehr als zwei anzunehmen sind, nur 3 Einheiten. Wir kommen also zu dem Ergebnis, daß die Steigerung der Hebung vor dem siebenten Jahrtausend eine ähnlich große war wie die Abnahme danach.

Wir versuchen nunmehr die Intensitäten der mittleren fennoskandischen Hebung in roher Annäherung durch folgende Zahlenreihe (anstatt einer Kurve) darzustellen.

Mittlere Hebung von Fennoskandia seit dem Eisrückzug:

v. Chr.		n. Chr.														
Jahrtausend		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
Jahrtausend	II I	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV
Hebung (m)	4.8 6.2	9.6	12.5	15.4	14.9	7.2	30.8	65.6	26.0	10.3	4.9	2.2	0.9	0.4	0.2	0.1

Die aufrechtstehenden Zahlen sind aus denen für die mittlere Hebung Schwedens in den letzten 9000 Jahren durch Multiplikation mit 4.8 m erhalten worden, in der Weise, daß ihre Summe 167 m ergibt, die Kursiv-Zahlen sind interpoliert mit der Bestimmung, daß ihre Summe, wie oben verlangt, 45 m ergibt, daß sie sich auf mehr als 3000 Jahre verteilen und stetig von 0 auf 65.6 m wachsen. Unter dieser Bedingung bleibt keine große Freiheit für die Wahl der Zahlen.

Unsere Zahlenreihe läßt erkennen, daß der Hauptanteil der fennoskandinavischen Hebung auf die letzten 12000 Jahre entfällt, und daß nur wenige Meter für frühere Zeit übrigbleiben. Sehr langsam setzte die Hebung ein. Ob wir jenen geringen Betrag nun auf mehr oder weniger als 5000 Jahre, wie oben geschehen, verteilen, ist für die Gesamthebung ganz gleichgültig und ist rein willkürlich. Unsicher bleibt, wann dieselbe einsetzte. Ein Mittel, deren Dauer zu schätzen, gewährt unsere Untersuchung nicht.

Um eine Vorstellung von den Massen zu gewinnen, die im Bereiche der skandinavischen Hebung innerhalb der Kruste in Bewegung gedacht werden müssen, haben wir in Tabelle II den Umfang der Isobasen und der von ihnen eingeschlossenen Volumina zusammengestellt. Daraus sind die Massen hergeleitet, die unter ihnen im Durchschnitte auf der Längeneinheit passiert sind. Es zeigt sich, daß in den peripherischen Gebieten dies Einströmen in ziemlich gleicher Stärke geschehen ist oder geschieht. Im Bereiche der postglazialen Hebung sind auf je 1 km. der 0 m-, 50 m-, 100 m- und 150 m-Isobase rund je 70 cbkm eingeströmt, und es strömen gegenwärtig jährlich im Bereiche der 0 m-, 2 mm-, 4 mm- und 6 mm-Isobase je 2000 cbm auf 1 m Grenzlänge ein. In den Zentralgebieten ist dieses Einströmen heute geringer und ist so auch seit Beginn des Eistrückzuges gewesen; daran ändert sich nichts, wenn wir nicht mit den verbesserten, sondern den gemessenen Höhen der Isobasen rechnen.

Tabelle II.

Umfang (U in 1000 km) und eingeschlossene Volumina der Isobasen (V in 1000 cbkm, v in cbkm). E = Einströmen auf 1 km des Umfanges in cbkm, e = Einströmen auf 1 m des Umfanges in cbm.

Postglaziale Hebung			Postglaziale Hebung verbessert			Jährliche Hebung			
	U	V		V	E		U	v	e
0 m	6.6	293.9	0 m	420.7	70	0 mm	6.4	11.748	1840
50 m	5.5	278.6	55 m	403.9	73	2 mm	5.4	11.074	2050
100 m	4.7	240.2	120 m	359.1	76	4 mm	4.3	9.586	2230
150 m	4.2	197.7	200 m	300.5	71	6 mm	4.1	8.136	2030
200 m	3.0	111.7	300 m	182.3	60	8 mm	3.0	4.965	1650
250 m	1.5	24.9	430 m	41.8	28	10 mm	1.6	1.500	940

Unsere Untersuchung über die Anwendbarkeit der Theorie glazialer Krustenbewegungen infolge von Belastung und Entlastung mit Eis hat eine plausible Beziehung zwischen den durch die Eislast verdrängten und seither wieder in das Gebiet der Vereisung zurückgekehrten Massen erkennen lassen. Diese sind kleiner als jene, was notwendigerweise der Fall sein muß, weil die Rückkehr noch anhält. Die zurückgekehrten Eismassen lassen auf eine Mächtigkeit der Vereisung von 630 m schließen, diese Zahl muß daher als Minimalmaß für jene Mächtigkeit gelten, die wir annähernd zu 1000 m veranschlagen. Das Tempo der Rückkehr ist kein konstantes, es hat ein Maximum im 6. bis 8. Jahrtausend v. Chr., kurz nach Zerfall der nordischen Vergletsche-

rung, gehabt. Seither hat sich die Hebung Fennoskandias sehr verlangsamt, obwohl etwa der dritte Teil der verdrängten Massen noch nicht zurückgekehrt ist. Sie muß daher noch geraume Zeit anhalten. Die ihr vorausgegangene, durch die Last des Eises bewirkte Senkung hat ungefähr bis an die Grenzen der Vergletscherung gereicht; wenn ihr hier Hebungserscheinungen nicht gefolgt sind, so hängt es damit zusammen, daß die an die Vergletscherungen gebunden gewesenen Wassermassen dem Meere zurückgegeben sind und die allerdings kaum sehr bedeutende Hebung verschleiern. Es sind eustatische Bewegungen des Meeresspiegels, die wir nahe dem Rande der alten Gletschergebiete bemerken und die in denselben auftretenden Hebungen hier wett machen, während sie weiter gegen die Mitte hin nur deren Beträge mindern. Im Umkreise um die Gletschergebiete haben wir es heute allgemein mit Senkungserscheinungen zu tun, verursacht durch das Zurücksinken der aufgedrehten peripherischen Zone. Sie werden verstärkt durch die auf der Erde durch das Schmelzen des Eises verursachten eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels, die außerhalb der Aufpressungszone Gelegenheit bieten könnten, den Rhythmus der Glazial- und Interglazialzeiten und die Volumina der bald als Eis ans Land gebundenen, bald wieder frei werdenden Wassermassen, die wir nur vage in Betracht ziehen konnten, genauer zu schätzen. Der Rhythmus dieser eustatischen Bewegungen ist ein universeller auf der ganzen Erde, der der glazialen Krustenschwingungen beschränkt sich auf die Gebiete der alten Vergletscherungen und ihre Umgebung. Jene folgen den Klimaänderungen auf dem Fuße, diese hinken ihnen nach. Die nordische Vergletscherung ist seit Jahrtausenden geschwunden, die Hebung hält noch an, weil sich die Rückkehr der aus dem Gletschergebiete verdrängten Massen langsamer vollzieht als der Rückzug des Eises. Da wir aber Gründe fanden, daß die Eindrückung des Gletschergebietes bis dicht an dessen Grenzen erfolgt ist, müssen wir annehmen, daß das Anwachsen der Vergletscherung mitsamt ihrem Verweilen in ihrem Maximalstande erheblich länger gedauert hat als ihr Rückzug und die ihm folgende eisfreie Zeit. Deren Dauer mußte 12000 Jahre um so viele überschritten haben, als das Eis brauchte, um sich aus der jütischen Halbinsel und aus Norddeutschland bis Schonen zurückzuziehen. Während dieser Zeit war die Hebung mutmaßlich sehr gering, und es fehlt zur Zeit noch jeder Anhalt, nähere Beziehungen zwischen Eisrückzug und Hebung aufzufinden. Doch dürfen wir solches wohl für die Zukunft erhoffen. Wenn wir erst genauer wissen, wie rasch die Massenversetzungen in der Tiefe auf die Entlastung der Kruste reagieren, dann dürfte sich auch die Möglichkeit bieten, aus den Hebungserscheinungen Schlüsse auf die Dauer des beginnenden Eisrückzuges zu machen.

Ausgegeben am 19. Oktober.