

# Sonderabdruck

aus den Frankfurter Geographischen Heften XI./Jahrg. 1937

---

## Die Hundertjahrfeier des Vereins für Geographie und Statistik

am 8. und 9. Dezember 1936.

zu Frankfurt a. M.

# Eiszeitliche Krustenbewegungen.

Von Geheimrat Prof. Dr. Albrecht Penck, Berlin.

Krustenbewegungen während des Eiszeitalters, Hebung der Alpen, Formen der Alpen, Isostatische Bewegungen in ehemaligen Gletschergebieten. Eustatische, strophische und epistrophische Bewegungen an Küsten. Strophische und epistrophische Bewegungen während des Eiszeitalters. Übertagen der epistrophischen Bewegungen während des Eiszeitalters. Das Verhältnis von kyrtotischen und tektonischen Bewegungen. Fortdauer der Gebirgsbildung.

Die Beziehungen zwischen Krustenbewegungen und Eiszeit können unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten untersucht werden. Es kann sich fragen, ob solche unmittelbarer Art vorhanden sind, ob Eiszeit und Krustenbewegungen in einem bestimmten Abhängigkeitsverhältnisse zueinander oder zu einer dritten Erscheinung stehen. Man kann aber auch untersuchen, welche Arten und Summe von Krustenbewegungen während eines Eiszeitalters, also eines bestimmten Abschnittes der Erdgeschichte gespielt haben. Das soll im folgendem geschehen, und zwar für das letzte Eiszeitalter, an das sich die Gegenwart anschließt. Ausgeschlossen aus der Betrachtung bleiben die durch Eisschub bewirkten Zusammenstauungen, denn sie betreffen nicht die Kruste als solche, sondern nur die obersten Schichten. Man nennt das letzte Eiszeitalter in Deutschland auch Diluvialzeit. Das Wort erinnert an die Sintflut und nur in weit übertragenem Sinne an große Vergletscherungen, welche namhafte Teile der Erdoberfläche betrafen und unterbrochen waren von eisfreien Zeiten. Der wiederholte Wechsel von Eiszeiten und Aperzeiten macht das Eiszeitalter aus. Es reicht so dicht an die geologische Gegenwart, das Alluvium der älteren Geologen, heran, daß wir diese unbedenklich in unsere Betrachtung einschließen können. Es folgt dem Pliozän und wird von diesem als Pleistozän, vom Tertiär als Quartär geschieden. Hier liegt die Schwierigkeit der Grenzziehung. Wir vermeiden sie theoretisch, indem wir auf das physikalische Geschehen der großen Klimaschwankungen Gewicht legen und erst in zweiter Linie die Entwicklung der Lebewelt heranziehen, die ja die Grundlagen für die Einteilung des Tertiärs geliefert hat. Praktisch wird dadurch jene Schwierigkeit nicht beseitigt. Aber für unsere Betrachtung ist es ziemlich gleichgültig, ob man diese oder jene Ablagerung, die der Grenze nahesteht, noch zum Pliozän oder schon zum Eiszeitalter stellt. Gehen doch die Schätzungen über dessen Dauer nach Jahren weit auseinander, aber wenn sie sich auch zwischen 500.000 und einer Million Jahre bewegen, so ist es doch nur ein sehr kleiner Teil der

durch die Entwicklung der Lebewelt belegten geologischen Vergangenheit, nämlich  $\frac{1}{1000}$  bis  $\frac{1}{500}$ . Das müssen wir bei unserer Untersuchung immer im Auge behalten. Ebenso müssen wir inne sein, daß es sich nicht um das Schlußkapitel der Erdgeschichte handelt. Sie ist noch lange nicht abgeschlossen. In dieser Auffassung weichen wir grundsätzlich von den alten Geologen ab, welche meinten, mit der Erschaffung des Menschen sei Ruhe eingetreten in der geologischen Entwicklung, und geneigt waren, die Erhebung der Gebirge in die Tertiärperiode zu verweisen.

---

Die „letzte und schließliche Erhebung der Alpen fand in der zweiten Hälfte des Tertiärs statt“, schrieb noch 1872 Hermann Credner, drei Jahre später glaubte Eduard Suess \*) die Frage bejahen zu dürfen, daß die Ursachen, durch welche die großen Kettengebirge des mediterranen Europas entstanden sind, heute noch wirksam sind und brachte eine Menge Beispiele jugendlicher Krustenbewegungen bei. Er sprach von einer Fortdauer der gebirgsbildenden Kraft; damit hat er einen großen Eindruck auf die zeitgenössischen Geologen gemacht. Hinsichtlich der Alpen aber bemerkte er, daß sie keine deutliche Spur einer seit der Diluvialzeit eingetretenen größeren Änderung zeigen. Das konnte ich 1882 bei meinen ersten Untersuchungen über die Vergletscherung der Deutschen Alpen bestätigen. Allenthalben ergab sich, daß der Gebirgsbau älter als das Eiszeitphänomen ist; nirgends treten dessen Ablagerungen in ihn ein, es ist eine feste Altersfolge: Schichtstörungen, Talbildung, Eiszeit. Erst im Laufe der Jahre stellte sich heraus, daß die Alpen weder während der Talbildung, noch während der Eiszeit unbeweglich geblieben sind. Sie haben, wenn wir sie in ihrer Gesamtheit betrachten (1908), gegenüber ihrer Umgebung eine Hebung erfahren, aber diese war in ihren einzelnen Teilen ungleich. Das erhellt aus Ablagerungen des Eiszeitalters und aus dem Formenschatze des Gebirges, der neben deutlicher Beeinflussung durch die eiszeitlichen Gletscher auch solche durch junge Krustenbewegungen erkennen läßt.

In den Zungenbecken der alten Gletscher, welche die Täler der Alpen erfüllten und aus dem Gebirge heraustraten, finden sich interglaziale Seebildungen, welche höher ansteigen als die talabwärts gelegenen Gebiete. Dahin gehören die alten Deltas von Brannenburg im Inntale, des Mönchsberges bei Salzburg, vom Rosental in Kärnten, im Tagliamentale und am oberen Ende des Gardasees. Keiner der

---

\*) Die Entstehung der Alpen. 1875. S. 56, 145.

durch diese Ablagerungen angezeigten Seen wird durch einen Endmoränenkranz aufgestaut, ein jeder reicht höher, alle waren einst tiefer gelegen und sind mit dem benachbarten Gebirge seit der großen Interglazialzeit gehoben worden. Am auffälligsten sind die einschlägigen Erscheinungen im unteren Inn- und oberen Isartale (1922). Hier finden wir Ablagerungen von Seen der letzten Interglazialzeit, deren Spiegelhöhen oberhalb Innsbruck und bei Mittenwald bis über 900 m ansteigen und hoch hinaufragen über die Talmündungen, was nicht durch irgend welche Abdämmung, auch nicht an den Flanken einer allgemeinen Aufschotterung erklärt werden kann. Auch hier haben wir es mit Beweisen nachträglicher Hebungen im Innern der Alpen zu tun, welche den Betrag von 300 m überschreiten. Diese Hebungen schwächen sich sichtlich talabwärts ab und machen sich weiter westwärts nicht mehr geltend. Im Loisachgebiete gab es bei Partenkirchen keinen interglazialen See; hier finden wir Anzeichen einer jungen Einsenkung mit jugendlichem Bruchrande. Im Einklange mit den jungen Hebungen steht die Tatsache, daß alte Talgesimse am Alpenrande gegen die Luft enden, was namentlich auf der Südseite auffällig ist.

Zur jugendlichen Erhebung eines Gebirges sucht man die korrelaten Ablagerungen an dessen Fuß. Bis hierher aber reichten in den Alpen die eiszeitlichen Gletscher. An Stelle der erwarteten Schotterkegel liegen deren Zungenbecken, umspannt von Endmoränen; erst an diese schließen sich Aufschotterungen an. Letztere aber sind nicht die Korrelate der Hebung, sondern gehören zu den Gletschern, die mehr Gesteinsmaterial herbeifrachteten, als die ihnen entströmenden Flüsse fortzuschaffen in der Lage waren. So ist es auch an der einzigen Stelle, wo in Friaul die Aufschüttungen der Poebene bis an den Alpenfuß heranreichen; hier blieben die eiszeitlichen Gletscher im Gebirge stecken, und die Aufschüttung ihrer Abflüsse setzte erst dort ein, wo Platz dazu war. Viermal hat sich während des Eiszeitalters die aufschüttende Tätigkeit der vom Eise kommenden Flüsse wiederholt; die Lage der Aufschotterungen zueinander ist auf der Nordseite des Gebirges eine verschiedene. Im Westen, in der Nordschweiz und in Schwaben hob sich das Alpenvorland, zwischen je zwei Eiszeiten schnitten sich die Täler ein, während der Eiszeiten wurden sie verschüttet; ineinander geschachtelt sind die verschiedenen Aufschotterungen, und die ältesten sind stellenweise so stark gehoben worden, daß benachbarte Teile von ihnen so verschieden hoch liegen, wie sonst die Schotter verschiedener Eiszeiten. Lokalforscher haben auf Grund solcher Tatsachen die Zahl der Aufschotterungen und

damit die der Vergletscherungen größer angenommen als vier und das Vorhandensein örtlich starker Krustenbewegungen bestritten. Wer das Auge weiter schweifen läßt, sieht gleich in der Nachbarschaft Beweise dafür, wie ungleich dieselben waren: sind links des Leches die Schotter ineinandergeschachtelt, so lagern sie an der Isar übereinander, sie sind hier auf sinkendem Boden abgelagert worden. In Schwaben hob sich das Alpenvorland während des Eiszeitalters, in Bayern sank es, es machte also verschiedene Bewegungen im Norden der Alpen. Im Süden der Alpen sank die Poebene ununterbrochen ein, aber die Grenze zwischen dieser Senkung und der Hebung der Alpen schwankte hin und her. Das marine Pliozän ist am Südrande des Gebirges stellenweise um Hunderte von Metern gehoben, in der Poebene liegt es in der Tiefe; hier kann man eine ununterbrochene Schichtfolge von Pliozän durch das ganze Quartär erwarten.

Auf der Nordseite der Alpen fehlt das jüngere Pliozän gänzlich. Nirgends liegt unter den Aufschotterungen des Eiszeitalters jungpliozänes Geröll, wie man es am Fuße eines sich hebenden Gebirges erwarten möchte. Ganz gerechtfertigt ist diese Erwartung jedoch nicht, denn es kommt darauf an, wie die Hebung erfolgt ist, die wir, ebenso wie für das Eiszeitalter, auch während des Pliozäns für die Alpen annehmen. Geschah sie langsam, so zog sie nicht gerade eine große Belastung der Flüsse mit Geröll nach sich, es konnte glatt durch das Alpenvorland hindurch gefrachtet werden; die Fußfläche der Alpen liegt hier an der Stelle von Geröllfeldern, welche bei einer raschen Hebung entstanden wären. Dazu kommt, daß sich Anhaltspunkte ergeben, die durch die Höhe der interglazialen Deltas ange deutete letzte Erhebung der Alpen mit deren Belastung und Entlastung durch eiszeitliche Gletscher in Zusammenhang zu bringen.

---

Im Innern der Alpen fehlen Ablagerungen, aus welchen wir auf junge Bewegungen innerhalb des Gebirges folgern könnten; lediglich seine Formen geben uns über solche Aufschluß. Dabei ist zu berücksichtigen, daß dieselben maßgeblich durch die eiszeitlichen Gletscher beeinflusst worden sind. Wir dürfen daher nicht von oft vieldeutigen Einzelercheinungen ausgehen, sondern müssen große Züge ins Auge fassen. Solche treten uns namentlich in der Gipfelwelt entgegen. Sie zeigt ein unregelmäßiges Auf und Ab. Weite Gebiete halten sich in annähernd gleichen Höhen und haben rundliche Formen. Darüber erheben sich andere, ohne sich durch einen Fuß

abzusetzen; sie haben meist scharfe Grate, die eine gewölbte Gipfelflur anzeigen. Hier herrscht das eigentliche Hochgebirge. Gewiß haben an ihm auch die eiszeitlichen Gletscher genagt, aber die Kare treten häufig zurück oder fehlen ganz, wie in der Schweiz, wo die Bevölkerung keinen Namen für sie hat. Die Hanggletscher haben die Gipfelschneiden zugeschärft, aber diese bestünden ohne sie auch. An ihren Abfällen herrscht rascheste Zerstörung, die durch Stein Schlag angezeigt wird. Häufiger Temperaturwechsel, Gefrieren und Tauen löst ihn aus, aber er kann nur erfolgen, wo eine große Fallhöhe gegeben ist. Sie wird durch ihn ständig gemindert. Alle Grate sind rascher Abtragung unterworfen, können daher nicht alt sein. Sie erweisen die Jugendlichkeit der Gipfelflur. Sie können sich nur dauernd erhalten, wenn das Gebirge fortwährend ansteigt und zerschnitten wird von Tälern, sodaß der Höhenunterschied zwischen deren Tiefe und Erhebung des Kammes groß bleibt. Das Hochgebirge mit seiner Gipfelflur erscheint hiernach als ein Gebiet anhaltender Hebung, mag allein das Wasser, oder das Eis, mögen beide an seiner Abtragung arbeiten, die durch den klimatisch bedingten Gesteinszerfall lediglich eingeleitet, nicht aber bewirkt wird.

Die Art und Weise, wie sich das Hochgebirge von seiner Umgebung absetzt, bekräftigt unsere Ansicht. Die rundlichen Kämme werden höher und steiler, aus Hängen werden Wände, sie gehen allmählich in die Grate über. Die Gebirgsgruppe, die sich orographisch hervorhebt, ist morphologisch eine Einheit, wie verschiedenartig auch ihr innerer Bau sein möge. Sie ist wachsendes Gebirge, dessen Abtragung nicht so groß ist, wie seine Erhebung, ebenso wie ihre Talbildung derselben höchstens Schritt hält. Steile Absätze in der Gipfelflur, wie wir sie z. B. zwischen den Öztaler Alpen und dem Penser Gebirge finden, oder Unterbrechungen der Gipfelflur, wie eine solche den Brenner begleitet, weisen uns auf Unterschiede in der Geschwindigkeit der Gebirgserhebung.

Solche werden auch hier und da durch Felswände angezeigt, die nicht gesteinsbedingt sind und nicht zu bestimmten Tälern gehören. Eine solche erhebt sich z. B. auf der Westseite des Eibsees als Abschluß der Talweitung von Garmisch-Partenkirchen, innerhalb deren wir auch sonst Anzeichen junger Krustenbewegungen finden. Ich habe jene Wand 1924 als jungen Bruch gedeutet. Schutthalden, die sich bis zum Eibsee herabziehen, erweisen, daß sie in stetem Rückschreiten begriffen ist. Es liegt nahe, die Bildung des Eibsees mit ihrer Entstehung in Beziehung zu bringen. Das ist für die gesamte Hohlform, in der er liegt, wohl möglich, er selbst aber ist aufgedämmt

durch einen Bergsturz. Eine noch weit größere Wand, die schon seit langem auf einen Bruch zurückgeführt worden ist, zieht sich am Westufer des Gardasees entlang. Sie erinnert an die Laderas von Orotava und Güimar auf Teneriffa und schneidet das mehr denn 400 m über dem See gelegene Talgebiet von Tremosine, ebenso wie den Hang von Pregasina quer ab. Teile eines hochgelegenen Talsystems liegen hier vor, denen die Fortsetzung nach unten und das Gegenüber fehlt. Ich meinte, dies 1909 oberhalb Malcesine zu erkennen. Aber ein Aufenthalt daselbst 1933 hat mich überzeugt, daß es sich dort um eine gesteinsbedingte Abstufung, nicht um einen Rest eines alten Talbodens handelt. Es ist wirklich ein Bruch, der die Reste des Talgebietes am anderen Seeufer begrenzt, und der den 700 m über dem See gipfelnden Monte Castello seewärts abspaltet. Die steilen Felswände dahier gehören zu ihm. Zahlreiche Klüfte und Rutschflächen, die man heute längs der Gardesana Straße bequem beobachten kann, sind die Begleiterscheinungen. Aber in den Felswänden selbst liegt der Bruch kaum noch unverletzt vor, sehr vieles ist von ihnen abgebröckelt. Möglicherweise ist dabei die glaziale Rundung verloren gegangen, die der eiszeitliche Gletscher erzeugte, als er an ihnen passierte, was wahrscheinlich der Fall gewesen ist. Sehr viel höheres Alter können wir dem Bruch nicht zuschreiben. Für die Entstehung des Gardasees kommt er höchstens mittelbar in Betracht, indem er dem Gardaseegletscher die Bahn vorschrieb und die Lage von dessen Zungenbecken beeinflusste.

Das Tal des Gardasees ist ein ausgesprochen asymmetrisches. Sanft senkt sich die östliche Flanke zum See herab, es ist eine Schichtplatte des Monte Baldo-Zuges. Im Westen zeigen Struktur und Felswände den jungen Bruch an. Dazwischen lagen einst anstelle des Sees alttertiäre Schichten, unter die die Juraplatte des Monte Baldo untertaucht; sie sind oberhalb des Sees im Monte Brione bei Riva erhalten. Hier auch bekundet marines Miozän, daß zur Zeit des Miozäns ein Meerarm durch das Gardaseetal in die Alpen eindrang. Das Seetal ist eine zerbrochene Mulde des Tertiärs; ihr Bruchrand ist später, während des Eiszeitalters wieder aufgelebt.

Auch die großen Längstäler der nördlichen Ostalpen fallen wenigstens teilweise in den Bereich eingesenkten Alttertiärs, so das untere Inntal und das Ennstal. Letzteres zeigt stellenweise einen ähnlichen asymmetrischen Querschnitt wie das Gardaseetal; sein Südgehänge senkt sich verhältnismäßig sanft zwischen den Mündungen der aus den Niederen Tauern kommenden Täler zu ihm herab. Noch ausgesprochener ist dies im oberen Salzachtal. Man meint, ein ähnliches

Herabbiegen einer zusammenhängenden Hangfläche auf der Südseite des Ober-Pinzgaus zu erkennen, wie am Gardasee, aber es handelt sich nicht um eine Schichtplatte, möglicherweise aber um eine Auflagerungsfläche von Alttertiär, wie jene es gewesen ist. Denkt man sie sich nach oben fortgesetzt, so kommt man über die Grate der Hohen Tauern, die wie herausgearbeitet aus ihr erscheinen. Ganz anders ist die Nordseite des Oberpinzgaus gestaltet, da haben wir Felsterrassen und ein ähnliches felsiges „Mittelgebirge“ wie im Inn-tale. In allen drei Längstälern reichen jugendliche Aufschüttungen nicht nur tief unter die Talsohle, sondern auch tief unter die Felschwelle, die sich am Ende der breiten Längstalstrecke erhebt. Dies ist auf glaziale Übertiefung zurückgeführt worden, kann aber auch Folge einer jungen Einbiegung sein. So fehlt es denn auch in unseren großen Längstälern nicht an Anzeichen, daß in ihnen die Krustenbewegungen, die ihnen den Weg wiesen, noch lange nachgewirkt haben.

Tief dringt auf der Ostseite der Alpen das Miozän in die großen Längstäler ein; Mürz- und oberes Murtal sowie das Drautal waren damals schon angelegt. Steile Aufrichtung des Miozäns, namentlich an seinen Südrändern, bekundet, daß hier seither Krustenbewegungen stattgefunden haben. Sie bestanden auf der einen Seite in einer Fortdauer der Einsenkungen, auf der anderen in einer solchen der Erhebung der benachbarten Gebirgsgruppen. Auch Brüche setzten ein, ein solcher begrenzt das Wiener Becken gegen Westen. Er zeugt aber nicht von einem Einbruche der Alpen, sondern von deren Erhebung. Erst der große Leopoldsdorfer Bruch, der oberflächlich nicht kenntlich das Wiener Becken durchzieht, verrät eine hier stattgefundene Senkung. Die jungtertiäre Erhebung der Alpen ist wie folgt: Es heben sich die einzelnen Gruppen heraus und daneben sinken breite Längstalstreifen ein. Der Hebungsvorgang erfaßte nicht bloß früher gefaltete, zusammen- und übereinandergeschobene Gebirgsteile, sondern greift in den südlichen Kalkalpen weit darüber hinaus und gliedert an die Alpen Gebiete an, die die starken Bewegungen am Ende des Mesozoikums nicht mitgemacht haben. Strukturell stehen sie ihnen fremd gegenüber, morphologisch gehören sie zu ihnen. Diese Bewegungen haben während des Eiszeitalters angehalten. Aber die Erhebung hat vorgewaltet. Auch die jungtertiären Aufschüttungsgebiete werden von ihr erfaßt und von tiefen Tälern zerschnitten. Nur an wenigen Stellen dauerte die Einsenkung fort und betraf Täler, deren gesamte Tiefe also nicht ausschließlich Flußwerk ist.

Auf dieser Tatsache und nicht allein auf den abweichenden klimatischen Verhältnissen beruht der große Unterschied im Aussehen der großen Alpentäler und des Großen Canyon des Colorado. Sein Einschneiden geschah stetig in eine große, sich allmählich hebende Scholle. Seine Talgehänge sind regelmäßig gestuft je nach dem Gestein und machen anschaulich, wie groß die Hangabtragung bei der Verbreiterung des Tales gewesen ist; nur zum kleinsten Teile kann es als Flußwerk gelten. In den Alpentälern hingegen sieht man vielfach Gesimse, welche Pausen in der Talbildung oder Überbleibsel von Flachhängen sind; die Enden von Riedeln sind abgestuft und in Eckfluren verwandelt. Man sieht allenthalben Wasserwirkungen, aber es ist sehr schwer, sie miteinander zu verbinden; persönlichem Ermessen fällt dabei ein weiter Spielraum zu; nur große Formen können zur Wiederherstellung eines präglazialen Talbodens dienen. Vieles ist durch die eiszeitlichen Vergletscherungen verwischt, manches neu gebildet. Am Rande der großen Gletscher flossen bei deren Kommen und Schwinden Bäche entlang, welche ihre Spuren am Talhang einkerbten. Viele Talstrecken wurden übertieft, Gehängefalten zu Karen erweitert. Das Eiszeitwerk gibt den Alpen die charakteristischen Züge, leiser schimmern die Wahrzeichen der Hebungsgeschichte hindurch, und hier ist das bezeichnende, daß die höchsten Teile, die als Hochgebirge zur Gipfflur aufragen, sowie die engsten Strecken der großen Täler die jüngsten Formen sind, die die Hebungen anzeigen.

---

Für die älteren Geologen, welche die Erhebung der Gebirge für abgeschlossen hielten, lieferte Skandinavien das Beispiel einer allmählich vonstatten gehenden, säkularen Hebung, nachdem der Gedanke fallen gelassen worden war, das Wasser sei von den Küsten abgeflossen, sodaß diese auftauchten. E d u a r d S u e s s , der so entschieden für die seinerzeit noch unerwiesene jugendliche Hebung der Alpen eintrat, zweifelte daran, aber seine Gründe erwiesen sich bald als hinfällig. Es ergab sich jedoch, daß diese Hebung gleichzeitig mit einer Bewegung des Meeresspiegels einsetzte, welche früher aufhörte. Als die großen Vergletscherungen des Eiszeitalters schwanden, gaben sie dem Ozeane so viel Wasser zurück, als zu ihrer Bildung nötig gewesen war, und der Meeresspiegel stieg an. Das geschah allenthalben auf der Erde, das war eine große e u s t a t i s c h e B e w e g u n g , wie sie E d u a r d S u e s s für möglich gehalten hatte. Man spürt sie an den meisten Küsten in den untergetauchten Tälern.

An den Gestaden Skandinaviens aber wird sie, wie schwedische und finnische Forscher gezeigt haben, verschleiert durch den stärkeren Vorgang der Hebung. Er setzt gleichfalls mit dem Schwinden des Eises ein, ist aber örtlich beschränkt auf das vergletschert gewesene Gebiet, welches entlastet vom Eise heute noch ansteigt.

Der Vorgang steht nicht allein. Er kehrt in Nordamerika in allen Einzelheiten wieder. In dem Maße, als sich das Inlandeis zurückzog, stieg auch dort dessen Untergrund auf. Das spürt man aber nicht bloß an den Küsten des Meeres, sondern auch an den Ufern seiner großen Seen. Alte Uferlinien sind heute schräg gestellt, sie steigen in der Richtung an, in der sich das Eis zurückzog. Die Rechnung ergibt, daß dies Ansteigen nicht Folge von der anziehenden Wirkung des zurückweichenden Eises sein kann; die Beobachtung lehrt ferner, daß es sich nicht um ein Ansteigen der Eisunterlage handelt, die durch das Eis stark abgekühlt, sich bei dessen Rückgang erwärmte, denn die geothermische Tiefenstufe ist im Bereiche der großen Seen außerordentlich gering, das Land ist also noch bis in große Tiefen abgekühlt. Es handelt sich vielmehr um einen Vorgang, der wie der experimentelle Beweis für die Richtigkeit einer Anschauung erscheint, zu welcher geodätische Messungen geführt haben. Nach denselben befindet sich die Erdkruste in einem isostatischen Gleichgewichte, das heißt in Kegelstumpfen von gleichem Durchmesser befinden sich bis zu einer gewissen Tiefe bei verschiedener Höhe der Kegelstumpfe gleiche Massen. Die Meereshöhe der Erdkruste ist umgekehrt proportional ihrer Dichte. Wird sie beladen, so sinkt sie ein, wird sie entlastet, so steigt sie an, um ihr isostatisches Gleichgewicht zu behalten. Durch die großen eiszeitlichen Vergletscherungen, deren durchschnittliche Mächtigkeit 1000 m überstieg, wurden große Krustenteile belastet, und sie wurden entlastet, als das Eis schwand. Wenn nun die Isostasie eine allgemein gültige Regel für die Erdkruste ist, mußte diese sich unter der Eislast einbiegen und steigen, als das Eis schwand. Das ist geschehen und dadurch erwiesen, daß die Isostasie der Erdkruste nicht bloß ein augenblicklicher Zustand ist, sondern auch für die Vergangenheit gilt. Von diesem Ergebnis ausgehend kann man sich fragen, ob die junge Hebung der Alpen, welche durch die hochgelegenen Seenablagerungen am Ausgange der Alpentäler angezeigt wird, nicht auch auf eine isostatische Bewegung zurückgeführt werden darf, die das Gebirge infolge seiner wechselnden Belastung und seinen während des Eiszeitalters riesengroß gewordenen Gletschern durchmachte. Sie betrug während der letzten Eiszeit in den großen Alpentälern 1000—1500 m, im Etschtale bei Meran sogar 2000 m; auf den Kämmen

war sie allerdings gering. Immerhin darf man in den Ostalpen mit einer Eislast von durchschnittlich 500—700 m rechnen, die das Gebirge um 150—300 m eindrücken konnte, falls der 150—200 km breite Krustenstreifen nachgiebig genug war. Dies aber kann man auf Grund einer tektonischen Beweglichkeit annehmen.

Wenn aber die Eislast die Kruste eindrückt, so müssen Massen in der Tiefe in Bewegung kommen; sie werden zur Seite gedrängt, und wir erwarten rings um die Eislast herum eine Aufquellung der Kruste, die verschwindet, wenn die benachbarte Last weggenommen wird. Hier sinkt das Land zurück, während es dort ansteigt. Beweise dafür liefern die deutschen Ostseeküsten. Sie sinken jetzt, während Skandinavien sich erhebt. Beide Vorgänge hängen zusammen und bilden insgesamt das, was man früher säkulare Bewegungen des Landes nannte. Dieselben sind isostatischer Art.

---

Als Grove<sup>1</sup> Karl Gilbert\*) 1890 die Begriffe Orogenese und Epirogenese von einander schied, hatte er lediglich den Gegensatz zwischen Gebirgen als engeren geographischen Wellen, und den breiten Anschwellungen im Auge, welche Kontinente, Plateaus, Meeresboden und Kontinentalbecken bilden; er war der Meinung, daß die orogenen und epirogenen Kräfte und Vorgänge möglicherweise dieselben sind. Die Gebirge in dem durch seine Untersuchungen klassisch gewordenen Bonneville-Becken bezeichnete er als orogen, das Becken selbst aber faßte er als epirogen auf; die Verbiogungen der Uferterrassen des alten Bonneville Sees war er geneigt, auf isostatische Bewegungen zurückzuführen, die hervorgerufen waren durch die infolge des Austrocknens des Sees bewirkte Entlastung von dessen Boden. Er unterschied also die isostatischen Bewegungen von den orogenen und epirogenen. Seinem Beispiele folge ich, und rechne die großen isostatischen Bewegungen in den Gebieten der alten großen Vergletscherungen nicht zu den epirogenetischen Bewegungen; denn sie führen nicht zu dauernden Veränderungen, sondern bewirken nur die zeitweilige Entfernung von und Rückkehr zu einer Ruhelage. Die Ausdrücke Orogen und Epirogen gebrauche ich in dem von Gilbert geprägten Sinne, wende für sie aber seit 1934 auch tektonisch und kyrtotisch an. Sie kennzeichnen die Entstehung von Formen und nicht<sup>2</sup> die von Strukturen; sie gelten für dauernde Krustenbewegungen, die wir am sichersten an den

\*) Lake Bonneville 1890. Monographs U.S.A. Geological Survey I, S. 3, 40.

Ufern von Binnenseen und an den Küsten des Meeres dort feststellen können, wo die großen isostatischen Bewegungen der Kruste keine Rolle spielen aber quartäre Uferlinien vorhanden sind. Der Kaspisee war gleich dem Großen Salzsee während der Eiszeit bis zum Überfließen gefüllt; im Manytsch hatte er einen Auslaß zum Schwarzen Meere, und die Scheitelhöhe dieses Auslasses (25 m) mußte die Höhe seines Spiegels bestimmen. Soweit ich die mir nur in Auszügen zugängliche russische Literatur zu überblicken vermag, liegen die alten Ufer des Kaspi im Norden an der Wolga tiefer, im Süden höher. Auf der Apscheron-Halbinsel steigen quartäre kaspische Ablagerungen sogar bis 278 m über den See an, sie gehören nicht zur letzten Eiszeit, sondern sind älter und schwach gefaltet, nach G. Mirčink\*) während der großen Interglazialzeit. Die ihnen entsprechenden Ablagerungen an der Straße von Kertsch sind gleichfalls orogenetisch bewegt. Hier haben wir danach den stratigraphischen Beweis für eine tektonische Orogenese während des Eiszeitalters, den wir für die Alpen nur mittelbar zu geben vermögen.

Lenken wir unseren Blick auf die Küsten, so haben wir zu beachten, daß sie allesamt den eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels unterworfen gewesen sind. Durch das Schmelzen des grönländischen und des antarktischen Inlandeises kann er bei einer 1933 als wahrscheinlich hingestellten Annahme für deren Mächtigkeit von 100 m um 55 m, keinesfalls aber auf mehr denn 60—70 m zum Anschwellen gebracht werden. Beide Beträge sind wahrscheinlich zu hoch, da die Füllung des Meeres eine isostatische Senkung des Meeresbodens zur Folge hat, die die Meeresräume erweitert und jene Beträge um etwa ein Drittel mindert. Hiernach sind alle marinen Quartärablagerungen, die höher als 40—50 m gelegen sind, entschieden gehoben. Dies gilt für die Muschelbänke mit Resten der heutigen Fauna in Chile und für solche in Alaska, die einige hundert Meter über dem Meere liegen. Sie zeigen eine Hebung an, die noch andauert und vielfach ruckweise erfolgt. Sie setzte gewiß nicht erst nach dem Eiszeitalter ein; sie erscheint als Fortsetzung der schon im Pliozän vonstatten gegangenen Hebung der Anden.

An vielen Küsten, und zwar namentlich auch an solchen, deren gebuchteter Verlauf das nacheiszeitliche Anschwellen des Meeres verrät, sehen wir marine Terrassen höheren, aber noch quartären Alters. Sie halten sich in einer Höhe von 20—30 m. Ihre Bildung geht dem

\*) La corrélation entre les dépôts quaternaires continentaux de la plaine Russe et les dépôts correspondants du Caucase et de la dépression Ponto-Caspienne. In A. A. Blochin. Beiträge zur Kenntnis des Quartärs des U.S.S.R. 1936, S. 15 (24, 30).

letzteiszeitlichen Tiefstande unmittelbar voraus, ihre Fauna ist im Mittelmeergebiet durch *Strombus bubonius* als interglazial gekennzeichnet. Durch die Häufigkeit ihres Vorkommens liefern sie den Beweis für einen Hochstand des Meeres in der genannten Höhe, der nicht das Schmelzen aller heute noch vorhandenen Inlandeismassen voraussetzt. Die noch höheren marinen Terrassen des mittelmeeerischen Quartärs, die ich der Analogie halber auch für interglazial halte, verlangen ein noch größeres, wahrscheinlich gänzlich schwindendes der heutigen Inlandeismassen. Denselben Rhythmus von jungen Hebungs- und Senkungserscheinungen wie an den Gestaden des westlichen Mittelmeeres finden wir auch an ozeanischen Küsten, so zum Beispiel an der Küste von Portugal, an der Ostküste von Afrika bei Mombassa, auf den Bermuda-Inseln (1934). Wir zweifeln nicht, daß sie auf Schwankungen des Meeresspiegels während des Eiszeitalters deuten. Dem widerspricht nicht, daß sie an vielen Küsten fehlen; denn hier machten sich neben den eustatischen Bewegungen des Meeresspiegels auch solche der Erdkruste geltend, die ich 1934 als strophische bezeichnet habe. Wenn zum Beispiel an der Nordostküste der Adria sämtliche Quartärterrassen des westlichen Mittelmeeres fehlen, so ist dies Folge der Senkung, die jenes Gestade erfahren hat und heute noch erfährt. Umgekehrt ist es Folge einer jungen Hebung, wenn wir die tyrrhenische Terrasse des Mittelmeeres mit *Strombus bubonius* unfern Korinth in beinahe 300 m Höhe finden; sie ist um etwa 250 m gehoben worden. Ebenso ist es die Folge von späteren Krustenbewegungen, wenn die Korallenriffe des interglazialen Hochstandes des Meeres die afrikanische Ostküste nur eine Strecke weit begleiten. Ihr Fehlen weiter nördlich zeigt eine Senkung des Landes an; ihr Vorhandensein erweist aber keine Hebung der Küste, sondern erscheint durch eine eustatische Bewegung des Meeresspiegels bedingt. Ob sich nun die wirklichen Hebungen und Senkungen der Kruste die Waage halten oder nicht, läßt sich zur Zeit noch nicht entscheiden; denn Schwankungen des Meeresspiegels und Krustenbewegungen führen innerhalb des 40—50 m Gürtels zu gleichen Erscheinungen. Auch darf man innerhalb desselben gleich hohe Terrassen nicht unbedingt für gleich alt halten. Verschieden alte können durch nachträgliche Krustenbewegungen in gleiche Höhe gebracht worden sein, und gleichalte isostatische und selbst eustatische müssen von vornherein nicht absolut gleiche Höhe in Bezug auf den heutigen Meeresspiegel gehabt haben; denn sie entsprechen gleich dem letzteren Geoidflächen. Diese aber sind nicht einander parallel. Groß können allerdings die Unterschiede nicht sein. Die Ab-

weichungen der Geoidflächen von der Sphäroidfläche der Erde sind erheblich kleiner, als man eine zeitlang geglaubt hat, solange man von der Isostasie der Kruste noch keine klare Kenntnis hatte.

---

Aufsteigende und abwärtsgehende Krustenbewegungen spielen im Innern der Länder dieselbe Rolle wie an den Küsten. Auf deutschem Boden ist an den Durchbruchstätern von Rhein und Elbe das Ansteigen der ganzen Mittelgebirgsschwelle vom Rheinlande bis Schlesien nachweisbar. Die Schotter von Mauer, die den bekannten Unterkiefer des Menschen geliefert haben, verraten, daß der Neckar noch während des Eiszeitalters am Durchbruche durch den Odenwald gearbeitet hat. Dieser ist seither um mehr als 100 m emporgestiegen; der aufgestaute Neckar suchte ihm auszuweichen und machte eine große Schlinge nach Süden, die sein Geröll anzeigt. Hier hat das sich hebende Gebirge eine Aufschüttung veranlaßt; im Elbegebiet von Böhmen finden wir davon nichts. Die Hebung in der Sächsischen Schweiz erfolgte so langsam, daß sie glatt durchschnitten werden konnte. Am Rheine liegen die Dinge wieder anders. Oberhalb des Rheinischen Schiefergebirges sank die Oberrheinebene ein und fing während des Eiszeitalters einige Hundert Kubikkilometer Gesteinstrümmen auf, die ihr der Rhein aus den Alpen zuführte. Die Erhebung des Rheinischen Schiefergebirges hat dies höchstens begünstigt, nicht veranlaßt. Nicht sein Stau, sondern das Einsinken ihrer Unterlage bewirkte die Verschüttung der Oberrheinebene. Was in dem mitteldeutschen Schollengebirge vonstatten ging, erfolgte auch im Bereiche der russischen Tafel. Hier wies G. F. Mirčink\*) ausgedehnte Hebungs- und Senkungsgebiete nach, deren Bewegung allerdings viel langsamer erfolgte, als die des benachbarten Bodens der großen nördlichen Vergletscherung. Die fortschreitende Erhebung der großen Zentralasiatischen Gebirge endlich wird durch die Engtäler der ihnen entströmenden Flüsse Oxus, Indus, Brahmaputra und Yangtsekiang erwiesen. Die Erhebung ist so rasch geschehen, daß sie die eiszeitliche Schneegrenze im Pamir, am Nanga Parbat (1936) und am Minya Gongkar nahe an die heutige herangerückt hat. Danach hätten wir es mit einem Ansteigen des Landes seit der letzten Eiszeit um 500—1000 m zu tun, also um 2,5—5 m im Jahrhundert. Das erscheint auf den ersten Blick erstaunlich viel, besagt aber nicht mehr, als daß im

---

\*) Epirogenetic oscillations in the European Part of the U.S.S.R. during the quaternary period. Transactions of the II. international conference of the Association on the study of the quaternary period in Europe. H. 2, 1933, 142.

Laufe von zwei bis vier Jahrhunderten einmal eine solche Hebung vorgekommen ist, wie sie 1899 in der Yakutat Bai in Alaska über Nacht geschah. Noch rascheres Ansteigen des Landes ist für den Beginn der isostatischen Heraushebung Skandinaviens für die Zeit unmittelbar nach der Eisschmelze errechnet worden.

Angesichts solch rascher Bewegungen drängt sich die Frage auf, wie lange sie währen; es muß ihnen ein Ende gesetzt sein; denn sonst würden die Berge in den Himmel wachsen. Daran werden sie schon durch die mit der Höhe zunehmenden Abtragung gehindert. Aber es besteht auch kein Zweifel darüber, daß die Geschwindigkeit der Hebung im Laufe der Zeit abnimmt und schließlich gleich Null werden kann. Es ist ferner denkbar, daß die Hebung durch eine Senkung abgelöst wird. Anzeichen eines solchen U m s c h w u n g e s von Hebung zu Senkung sind mir aus dem Eiszeitalter nicht bekannt. Aber es fehlt nicht an solchen für das Gegenteil, daß Hebung auf Senkung gefolgt ist. Manche jungtertiäre Senkungsfelder, ja selbst Gebiete eiszeitlicher Verschüttung sind während des Eiszeitalters gehoben worden. Dafür bietet das deutsche Alpenvorland Beispiele. Sein Tertiärhügelland ist eine gehobene Vortiefe der Alpen; die Diluvialplatten des bayerischen Schwabens sind gehobene Glazial-schotter älterer Eiszeiten. In beiden Fällen nun zeigt sich die oft bemerkte Asymmetrie der kleinen Täler. Diese Asymmetrie beherrscht auf der Iller-Lech-Platte auch die Lagerung des älteren Deckenschotter. Die Decke ist bei ihrer Erhebung ganz flach gewellt worden, so zwar, daß Wellenberge und Wellentäler asymmetrisch wurden; jene fallen steiler nach Westen ab, als nach Osten, diese haben umgekehrt sanftere Hänge auf ihrer Westseite als auf ihrer Ostseite. Die Asymmetrie der kleinen Tälchen geht meist zusammen mit einer Asymmetrie des Riedel zwischen den größeren Tälern, nach denen sich jene richten. So ist es im deutschen Alpenvorlande, so in Siebenbürgen, so auf der podolischen Platte. Derselbe Plan liegt dem Talnetz zwischen Pruth und Sereth in der Moldau, dem Lande westlich des Plattensees in Ungarn zu Grunde; er kehrt also in junggehobenen Gebieten wieder, wo ebenes oder fast ebenes Land anstieg, und die leichteste Kräuselung seiner Oberfläche für die Richtung seiner Täler maßgebend geworden ist. Diese hielten, als die Hebung stärker wurde, bei ihrem Einschneiden die anfänglich eingeschlagenen Bahnen fest. Die Kräuselung ist bezeichnend für den Beginn einer Erhebung bei einem Umschwung. Sie ist nur dann im Schichtbau nachweisbar, wenn die jüngste der bei einer Senkung abgelagerten Schichten sich erhalten hat und nicht durch spätere Abtragung entfernt

worden ist. Das ist meist geschehen. Kein Wunder daher, wenn die Tal-Asymmetrie bisher kaum mit Bewegungen der Erdkruste in Zusammenhang gebracht worden ist.

Die eiszeitlichen Krustenbewegungen beschränken sich nicht auf das Land, sondern greifen auch in das Gebiet des Ozeans. Die meisten untermeerischen Täler halten sich zwar innerhalb des Gürtels, in dem der Meeresspiegel von Eiszeit zu Eiszeit schwankte, aber nicht wenige reichen bedeutend tiefer \*). So namentlich die Rinne des Congo, die des Hudson, die des Indus, sowie kleinere an der Küste von Spitzbergen, Kalifornien und Japan. Sie alle können nicht alt sein; denn sonst wären sie längst zugeschüttet. Ob sie nun aber nur dem Eiszeitalter angehören, oder auch schon aus dem Pliozän stammen, sie lehren dasselbe, nämlich, daß in junger geologischer Vergangenheit eine Erweiterung der Meeresräume im Bereiche des Kontinentalsockels stattgefunden hat, und zwar daß Stücke desselben in die Tiefe herabgezogen sind. Das widerspricht der Annahme A. Wegeners, daß die Kontinente leichtere Schollen sind, die auf schwererer Unterlage gleichsam schwimmen und treiben. Es zeigt sich vielmehr, daß dasselbe Krustenstück hochgelegen dem Lande, tief gelegen dem Ozeane angehören kann, daß dieser auf Kosten des Landes wachsen kann. Nicht in der Beschaffenheit der Kruste, sondern in der ihrer Unterlage wurzelt die Verschiedenheit von ozeanischen und kontinentalen Räumen. Ihre Grenzen liegen nicht fest. Aber zu einem Austausch zwischen beiden ist es wenigstens in der jüngeren geologischen Vergangenheit nicht gekommen. Zwischen Nordamerika und Nordamerika erstreckt sich seit langem der nördliche Atlantische. Wir spüren ihn durch die ganze Tertiärperiode, und während des Eiszeitalters macht er sich durch seinen Einfluß auf das Klima Europas fühlbar. Er ist weder durch eine junge Senkung, noch durch das Abtreiben Nordamerikas entstanden. Zwischen der alten und der neuen Welt liegt ein altes Meer; ein Zusammenwachsen oder nur eine Berührung der beiderseitigen Inlandeismassen hat nie stattgefunden.

---

Weit verbreitet sind die Krustenbewegungen während des Eiszeitalters gewesen. Das läßt sich mit aller Klarheit aussprechen, ob-

\*) Vergl. die Arbeiten von Francis P. Shepard, Submarine Valleys (Geographical Review, 23, 1933, S. 77), Canyons beneath the sea (Scientific Monthly, 37, 1933, S. 31), Submarine canyons of the American coasts (Zeitschrift f. Geomorphologie, 9, 1935, S. 99), The underlying causes of submarine canyons (Proceedings of the National Academy of Sciences, 22, 1936, S. 496).

wohl wir sie in ihrer Gesamtheit nicht zu überblicken vermögen. Wir sind angewiesen auf Beobachtungen von Höhenänderungen, die wir an Küsten und Flußläufen, unter günstigen Umständen am Meeresboden anstellen können. Welche Horizontalverschiebungen stattgefunden haben, können wir nicht wahrnehmen. Alles, was sich in der Tiefe vollzogen hat, ist unseren Blicken entzogen. Dennoch läßt sich sagen, daß die Gesamtheit der Krustenbewegungen während des Eiszeitalters ansehnlicher gewesen sein dürfte, als in einem anderen gleichgroßen Abschnitte der Erdgeschichte; denn eine ganze Gruppe von ihnen war unstreitig größer als sonst, nämlich alle diejenigen, welche durch Belastung oder Entlastung der Erdkruste verursacht waren. Solche *isostatischen* Bewegungen treten allgemein auf als Folge der in der Tiefe wurzelnden strophischen Bewegungen. Wird ein Krustenstück gehoben, so wird es abgetragen und dadurch entlastet, wird es gesenkt, so wird es in der Regel durch Verschüttung belastet. Entlastung und Belastung stören das isostatische Gleichgewicht und lösen Bewegungen aus, welche in demselben Sinne wirken, wie die in der Tiefe wurzelnden strophischen, dieselben verstärkend und überdauernd, bis die durch sie geschaffenen Unebenheiten entfernt sind. Man kann diese Gruppe von isostatischen, weil ihre letzte Ursache in der Tiefe liegt, als *innenbürtige* bezeichnen. Sie treten ein, solange die Erdkruste von der Tiefe aus bewegt wird, sie schließen sich den echten strophischen Bewegungen auf das engste an und sind schwer von denselben zu trennen.

Die während des Eiszeitalters einsetzenden isostatischen Bewegungen der Kruste waren anders geartet. Sie hatten ihre letzte Ursache in *außenbürtigen* Vorgängen, nämlich in der Belastung einiger Teile des Landes mit Eis und der Entlastung des Meeres durch Wasserentnahme behufs Bildung der Vergletscherungen. Diese Bewegungen sind den in der Tiefe wurzelnden entgegen gesetzt. Wir bezeichnen sie daher als *epistrophisch*. Sie führen nicht zur Entlastung der hochgelegenen und Belastung der tiefgelegenen Teile der Kruste, sondern umgekehrt, zu einer Entlastung der tiefgelegenen Meeresräume, indem ihnen Wasser zur Bildung von Vergletscherungen entnommen wird; letztere aber gingen jeweils von Gebirgen aus und belasteten diese und ihre Umgebung. Welcher Art das Gebirge war, ob Schollenland oder Faltenland, ist dabei gleichgültig gewesen.

Das große nordamerikanische Inlandeis ging aus sowohl von den Schollen Labradors und Keewatins, als auch von den Kordilleren des Westens. Die dadurch ausgelösten epistrophischen Bewegungen waren mindestens 40—50 mal so groß, wie die heute stattfindenden in-

nenbürtig isostatischen. Das ergibt folgende Betrachtung: Die Abtragung des Landes beträgt heute im Mittel etwa 1 m in 10.000 Jahren; von seinen 149 Millionen qkm werden also in dieser Zeit 149.000 cbkm dem Meere zugeführt. Während einer Eiszeit konnten aber nach einer mäßigen Schätzung 62,3 Millionen cbkm Eis auf dem Lande liegen. Wurden diese im Laufe von 30.000 Jahren ans Land gebunden und schmolzen sie in einer gleich langen Zeit, so wanderten in 10.000 Jahren 20,8 Millionen cbkm zum Lande hin oder zurück. Das entspricht einer Gesteinsmenge von rund 7 Millionen cbkm, also einer 45 mal so großen Gesteinsmasse als gegenwärtig in 10.000 Jahren vom Lande zum Meere gelangt. An dieser Zahl wird nicht viel geändert, wenn wir für das Werden und Vergehen der Vergletscherung etwas andere Zeiten annehmen, sie wird größer, wenn wir den Vergletscherungen größere Mächtigkeit zuschreiben. Sie gewährt eine Vorstellung von der Größe von Krustenbewegungen, die nur in einem Eiszeitalter und zwar in diesem wiederholt spielten.

Das Eiszeitalter war eine Zeit epistrophischer Bewegungen der Erdkruste, die beim Kommen einer jeden Vergletscherung einsetzen, und, wie sich in der Gegenwart zeigt, deren Gehen wesentlich überdauern. Sie erfolgen in großer Stetigkeit. Langsam steigt Fennoskandinavien auf, ohne Erschütterungen, unmerklich für seine Bewohner, erst im Laufe von Jahrhunderten fühlbar. So regelmäßig ist der Anstieg, daß man ihn in Finnland chronologisch verwendet. Regelmäßig geformt ist das Aufwölbungsgebiet, erst in Einzelheiten erweisen sich die Verschiedenheiten des geologischen Baues der verschiedenen Teile. Wir haben keinen Grund, daran zu zweifeln, daß es beim Schwinden früherer Vergletscherungen und bei deren Kommen anders gewesen ist. Die durch die Eisbelastung bewirkte Eindrückung der Erdkruste war theoretisch so vielmal kleiner als ihre Mächtigkeit, wie die Unterlage spezifisch schwerer als das Eis, also rund ein Drittel. Der bisher gemessene Betrag des späteren Aufquellens hält sich in engeren Grenzen. Die ganze isostatische Schwankung, die zu einem Inlandeise gehört und selbst die in den Alpen erfolgte, besteht nur in einer Änderung in der Konvexität der Erdkruste. Diese wird lediglich sanft verbogen, sie macht eine typische kyrtotische Bewegung.

[Das doppelte Produkt aus ihrer größten Auf- oder Abwärtsbewegung ( $h$ ) und der Länge des Erdradius ( $r$ ) ist kleiner, als das Quadrat ihres Halbmessers ( $d$ ) ( $d^2 > 2rh$ ).]

Verteilt sich die Belastung der Erdkruste während einer Eiszeit auf eine geringe Anzahl von großen Inlandeismassen und zahl-

reichen kleineren Vergletscherungen, welche letztere vielfach nicht groß genug sind, um merkliche isostatische Bewegungen erfahren zu können, so bewirkt die Wasserentnahme aus dem Ozean eine allgemeine Senkung von dessen Spiegel und damit in allen Meeren eine Entlastung von deren Boden. Er muß ansteigen, um im isostatischen Gleichgewichte bleiben zu können, er muß allgemein sinken, wenn die Vergletscherungen abnehmen und ihm das entnommene Wasser zurückgeben. Auf mindestens 156 m beläuft sich die eustatische Schwankungsmöglichkeit seines Spiegels, auf rund den dritten Teil dieser Größe der Betrag der epistrophischen Bewegung seines Bodens. Voll kann sie natürlich nur dort sich entfalten, wo die Meerestiefe größer gewesen ist, als 156 m, gerechnet von jenem Meeresspiegel aus, den wir erhalten, wenn alles Eis geschmolzen und zum Meere zurückgekehrt ist, nämlich 55 m über dem heutigen. Damit gewinnt die heutige Tiefenlinie von rund 100 m die besondere Bedeutung einer Grenze für die volle Entfaltung epistrophischer Bewegungen des Meeresbodens. Jene Tiefenlinie liegt nahe an der Grenze der Flachsee und diese tritt damit in einen größeren Gegensatz zur Tiefsee.

Die während des Eiszeitalters ausgelösten epistrophischen Bewegungen haben 40 Millionen qkm der Landoberfläche beeinflusst und sind wahrscheinlich auf 350 Millionen qkm des Meeresbodens fühlbar gewesen. Insgesamt haben sie mehr als 70‰ der Erdoberfläche betroffen. Heute noch wirken sie auf einigen Millionen Quadratkilometern kyrtotisch nach. Noch nicht sind die in der Tiefe wurzelnden strophischen Bewegungen wieder zur ausschließlichen Herrschaft gelangt, die sie vor der Eiszeit besaßen. Heute noch ist die Bewegung der Erdkruste eine gesteigerte. Wichtig ist die Erkenntnis, die die epistrophischen Bewegungen auch für das Wesen der strophischen liefern. Sie erweisen, daß die Erdkruste bei aller scheinbaren Starrheit biegsam ist; denn sie hat kyrtotische Bewegungen nach aufwärts und abwärts durchlaufen, ohne ihren Zusammenhang zu verlieren. Beweglicher ist ihre Unterlage. Wenn nun die Kruste über diesem Geoplasma Bewegungen macht, sich hebt und senkt, ohne daß eine Änderung ihrer äußeren Belastung eingetreten ist, so müssen wir dafür Zustandsänderungen oder Bewegungen des Geoplasmas verantwortlich machen; denn die Erdkruste erhält sich im isostatischen Gleichgewichte. Vollkommen ist dasselbe allerdings nicht. Es gibt Schwereanomalien die Hülle und Fülle. Aber dieselben sind doch im großen und ganzen geringfügig im Vergleiche zu den großen Unebenheiten der Erdoberfläche. Wenn wir daher sehen, daß dieselben

während des Eiszeitalters verändert, vergrößert oder verkleinert worden sind, so müssen wir auf Zustandsänderungen in der Unterlage der Kruste schließen. Hier liegt die Ursache für die echten strophischen Bewegungen.

---

Unter ihnen sind uns die orogenetischen besonders aufgefallen, welchen wir unter den epistrophischen nicht begegnet sind; große meist linear gestreckte Erhebungen sind durch sie gebildet worden. Daß daneben auch ähnlich geartete Eintiefungen erfolgt sind, hat unsere Betrachtung zwar nicht ergeben, aber wir treffen solche in den Vortiefen heute in so ausgedehnter Weise an, daß wir an ihrer Bildung auch während des Eiszeitalters nicht zweifeln können; sie liegen als Bathygen neben Orogen, beide zusammen bilden das Tektonen als das Werk von Krustenbewegungen, welche ansehnliche Unebenheiten hervorriefen. Neben dem strophischen Tektonen gibt es das strophische Kyrtogen; das besteht aus flachen, weit ausgedehnten Verbiegungen, die in ihrem Aussehen ganz den epistrophischen gleichen, aber sich nicht auf die Gebiete früherer Vergletscherungen beschränken und nicht bloß Änderungen in der Konvexität der Erdkruste darstellen. Unser Überblick über die Krustenbewegungen des Eiszeitalters gibt uns nur eine schwache Vorstellung von ihrer Verbreitung und ihrem Auftreten. Beides offenbart sich in den morphologischen Zügen der jetzigen Erdoberfläche; große Hebungs- und Senkungsgebiete von recht ebenem Gepräge in verschiedenen Meereshöhen erweisen, daß Bewegungen in der Senkrechten in weit größerem Umfange stattgefunden haben, als die epistrophischen wegen ihrer Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Vereisungen je erlangen können. Es handelt sich um Tausende, nicht bloß um Hunderte von Metern. Welcher Anteil dieser Bewegungen haben sie viel früher eingesetzt und während desselben angehalten, auf das Eiszeitalter entfällt, läßt sich nicht ermessen. In der Regel In dem Bewegungsbilde des Eiszeitalters treten sie entschieden gegenüber den epistrophischen zurück, die offenbar rascher vonstatten gehen. Sie bestehen nicht bloß in Veränderungen in der Konvexität der Erdkruste, sondern auch in der Bildung von großen Konkavitäten, womit nicht gesagt werden soll, daß letztere unbedingt zu ihrem Wesen gehören müßten. Es erscheint deswegen nicht möglich, sie auf geometrischem Wege von den kyrtotischen Bewegungen epistrophischer Art zu unterscheiden.

Aber auch ihre Trennung von den tektonischen strophischer Natur

fällt schwer. Indem G. K. Gilbert Orogenese und Epirogenese unterschied, faßte er zwei Extreme ins Auge, die sich nur durch ihre Größenverhältnisse unterscheiden, der Art nach aber gleich sein können. In der Tat gibt es Übergänge zwischen Gebirgen und Schwellen, den einfachen Aufbiegungen der Landoberfläche. Auch wenn man mit H. Stille \*) als Kennzeichen orogener Vorgänge hinstellt, daß sich bei ihnen Änderungen im Lagegefüge des Bodens vollziehen, gewinnt man kein wesentlich unterscheidendes Merkmal. Gewiß haben wir in Faltungszonen sehr starke Veränderungen im Lagegefüge der Kruste. Aber es gibt auch Stellen, wo solche geringer oder sehr klein sind. Wo da die Grenze zu ziehen ist, ist ebenso dem Übereinkommen überlassen, wie die Unterscheidung von Gebirgen und Schwellen. Es ist so wie auf der See, wo man die an Ort und Stelle entstandenen Windwellen zwar in der Regel von der aus der Ferne kommenden Dünung leicht unterscheiden kann, aber oft genug im Zweifel ist, was von beiden vorliegt. Das Bewegungsbild der Erdoberfläche erinnert auch sonst an das des Meeres, wo es neben glatter oder leicht gekräuselter See die größeren Wellen der Dünung und die kleineren des Windes gibt, wo überdies die ganz großen Gezeitenwellen und die riesigen Erdbebenwellen auftreten, und alle diese Wellen haben ihre eigene Brandung. Wie es aber möglich ist das Bewegungsbild des Meeres aufzulösen und verschiedene Wellen nicht an einer beliebigen Stelle, sondern an bevorzugten Beobachtungs-orten von einander zu trennen, so gelingt es auch im Bewegungsbilde der Erdkruste zunächst strophische und epistrophische Bewegungen, und unter jenen kyrtotische und tektonische zu erkennen, ohne daß es möglich wäre, dies überall zu tun. Die erstere Unterscheidung ist eine dynamische, sie führt uns auf die Ausgangsorte der Bewegung unter oder über der Kruste; die letztere ist zunächst zwar noch eine statische, sie unterscheidet zwischen Orten größerer oder geringerer Stärke von Bewegungen, die sich in Höhenunterschieden und Strukturen ausdrücken.

Unsere Untersuchung über die Krustenbewegungen während des Eiszeitalters ergibt die wichtige Tatsache, daß während desselben epirogenetische und orogenetische Bewegungen strophischer Art gleichzeitig stattgefunden haben; dieselben schließen sich also einander nicht aus, sondern kommen nebeneinander vor. Es kann sich nun fragen, ob die eine oder andere über- oder untergeordnet ist oder ob sie beide gleicher Ordnung sind. Beide wurzeln unter der Kruste, die selbst bis zu einem gewissen Grade biegsam, einer beweglichen Unterlage, dem

---

\*) Grundfragen der vergleichenden Tektonik 1924, S. 11.

Geoplasma aufrucht. Setzt sich dieses in Bewegung, so kann es die Kruste mit sich schleppen, sofern Platz vorhanden ist. Andernfalls haben wir es mit einem Bewegungsunterschied zwischen verschieden zähen Massen zu tun. Das führt zu einer Wellenbewegung an der Grenze beider. Wie sie erfolgt, lehrt ein einfaches Experiment.

Kippt man einen Teller mit dicker Milch, so setzt sie sich in der Richtung in Bewegung, nach welcher sie gekippt wird. Aber sie kann dabei nicht die Horizontalität ihrer Oberfläche herstellen, nach der jede Flüssigkeit strebt, sondern wird daran durch ihre Haut gehindert, sofern diese an den Tellerrand fest angewachsen ist. Sie vermag sich unter derselben nur zu sacken; dabei legt sich die Oberfläche in Falten. Eine Welle steigt nahe dem untern Tellerrande auf und neigt sich nach unten über. Sie gleicht einer übersteilen orogenetischen oder tektonischen Falte, die sich auf der Erdoberfläche nicht halten kann, sondern durch Abrutschungen oder Abbruch schon während ihrer Entstehung verkleinert wird. An sie schließt sich, durch ein Wellental von ihr getrennt, eine zweite minder hohe und minder steile Welle an, die gleichfalls asymmetrisch gebaut ist, und ebenfalls an ein typisches tektonisches Gebilde erinnert. Es folgt eine dritte Falte, von der dies weniger gilt. Entsteht noch eine vierte, so trägt diese meist auch das Gepräge einer Schwelle, die man schon als epirogenetischer Art deuten möchte, die aber doch nichts anderes als ein schwächlicher Nachzügler von tektonischen Formen ist. Insgesamt bezeichnen die Falten das Gebiet der Sackung, das die untere Tellerhälfte einnimmt, in der oberen Tellerhälfte wird die Oberfläche der Milch gestreckt und sinkt gleichzeitig ein. Hier hätten wir eine epirogenetische Senkung, während die zugehörige Hebung durch die Faltung gekennzeichnet wird, die orogene Formen und Strukturen aufweist. Kippt man den Teller zu stark, so reißt die Haut oben am Rande und schwimmt ab. Wird gleichzeitig die untere Falte zu steil, so reißt auch sie auf und die Milch quillt unter der Haut heraus. Die Faltung tritt nur ein, wenn die Haut eine entsprechende Dicke hat; ist sie sehr dünn, so bewahrt die Milch auch auf einem schwach gekippten Teller einen horizontalen Spiegel, ist sie zu dick, so kommt es nicht zur Sackung und Faltenbildung. Letztere tritt aber auch bei sehr dick gewordener Milch nach Entfernung der Haut nicht ein, es erfolgt lediglich ein langsame Schrägstellung ihrer Oberfläche. Die Haut ist also wesentlich für die Faltung. Aber nicht nur sie wird von der letzteren ergriffen, sondern auch die unterlagernde Milch. Diese steigt in den Faltensätteln auf, während die Haut in den Faltenmulden in die Milch herabgezogen wird. Es findet kein Zusammenschieben der Haut

über der Milch statt, sondern ein Zusammenstauen beider, das an der Grenze beider gut sichtbar wird.

Das Experiment deutet eine Richtung an, in welcher wir den Unterschied zwischen kyrtotischen und tektonischen Bewegungen strophischer Art suchen dürfen. Jene können bedingt sein durch die Bewegungen des Geoplasma, die sich auf verschiedene Ursachen zurückführen lassen. Diese aber könnten gedeutet werden als Erscheinungen, die an der Grenze von Geoplasma und Kruste wurzeln, wenn sich ersteres bewegt, und welche ihrerseits Bewegungen in der Kruste selbst auslösen, die instantan erfolgen, während der orogene Vorgang der Faltung so lange stetig erfolgt, als die Bewegung des Geoplasma andauert, aber bei einem Wechsel in deren Richtung seinen Ort ändern kann. Eines wird ferner durch den Versuch klar gezeigt: Die Faltung erweist nicht notwendiger Weise ein Kleinerwerden der Unterlage, sondern kann auch bei deren Bewegung entstehen. Die Faltung der Erdkruste darf nicht nur verglichen werden mit der Schrumpfung eines austrocknenden Apfels, sondern kann auch ähnlicher Art sein wie die Runzelung der Stirnhaut, die nichts mit einer Schrumpfung des darunter befindlichen Schädels zu tun hat, sie kann endlich derselben Art sein wie Faltung der dicken Milch auf unserem Teller.

Deren Falten sind vergänglich. Sie glätten sich aus, sobald wir den Teller wieder wagerecht stellen. Dann zieht sich die zu ihnen herabgezogene Haut wieder zusammen, und die Oberfläche der Milch wird wieder horizontal. Könnte man sie durch entsprechende Maßnahmen festhalten, so würde ein gefalteter Wulst bestehen bleiben, der eine eingesenkte Oberfläche überragt. Unser Experiment liefert gewiß nicht den Schlüssel zur Erklärung aller tektonischen Bewegungen und ihrer Beziehungen zu den kyrtotischen. Es zeigt lediglich, daß sie mit solchen im Zusammenhang stehen und ihnen untergeordnet sein können, und daß die Faltung der Erdkruste kein Beweis für das Kleinerwerden des Erdballes ist. Die großen strophischen Bewegungen, die Bildung von Geosynklinalen und die nachfolgende Gebirgsbildung werden durch das Experiment nicht aufgehellt.

---

Auf die möglichen Ursachen der strophischen Bewegungen soll hier nicht eingegangen werden. Aber betont muß doch werden, daß letztere stellenweise auch Ablagerungen des Eiszeitalters nicht bloß gehoben und gesenkt, sondern auch gefaltet haben. Daß solches am

Ost- und Westende des Kaukasus geschehen ist, ist bereits erwähnt worden. Einschlägige Erscheinungen sind aus dem kalifornischen Küstengebirge bekannt. H a n s S t i l l e <sup>1)</sup> hat kürzlich die Aufmerksamkeit auf sie gelenkt und ihre Beziehungen zur Epirogenese und Orogenese erörtert, welche Begriffe er in eigener Weise verwendet, anders als von G. K. G i l b e r t vorgeschlagen. Ich selbst bin 1909, 1927 und schließlich 1928 dort gewesen, mit der hohen Erwartung, die Gleichzeitigkeit von Krustenbewegungen mit dem Eiszeitalter erweisen zu können. Haben wir doch ein heute allerdings schwächlich, aber während der Eiszeit nicht unansehnlich vergletschertes Gebirge, die Sierra Nevada, neben einer Küste, längs derer stete Unruhe der Erdkruste herrscht. Aber leider läßt sich keine Beziehung zwischen den Bildungen des Eiszeitalters und den gestörten Schichten erkennen. Am Fuße der Sierra findet sich keine ähnliche Entwicklung fluvioglazialer Schotter, wie am Fuße der Alpen, auch dort nicht, wo auf der Ostseite die eiszeitlichen Gletscher aus dem Gebirge herausgetreten sind. Keine Beziehung läßt sich herstellen zu den oft außergewöhnlich mächtigen Schotterablagerungen des Küstengebirges, über deren genaueres Alter Meinungsverschiedenheiten herrschen <sup>2)</sup>. Beim Kartieren ist ein und dieselbe Bildung von demselben Geologen gelegentlich verschieden aufgefaßt worden. Manche ist sicher quartär, die große Masse aber ist pliozän. Sie gehören nicht zu fluvioglazialen Serien, sondern sind Ablagerungen am Gebirgsfuße entstanden. Manche bilden sich gegenwärtig noch fort und werden gelegentlich von jungen Verwerfungen durchsetzt. Andere schließen sich an das Pliozän an. Ihre Geröllfazies erweist, daß während ihrer Bildung fortwährend tektonische Bewegungen im Gange waren, die unablässig durch die Millionen Jahre des Pliozäns und des Eiszeitalters, bis in die Gegenwart dauern. Dabei entstand ein Gebirgsbau, der von allem, was wir in Europa kennen, erheblich abweicht.

Eine pasadenische Faltungsepoche, welche in die große Interglazialzeit fällt, habe ich in Kalifornien nicht erkennen können. Auf deutschem Boden allerdings haben sich während jener Zeit zahlreiche Krustenbewegungen abgespielt. Aber es ist darum nicht nötig, anzunehmen, daß sie deswegen unruhiger gewesen wäre, als andere Abschnitte des Eiszeitalters; denn sie hebt sich unter denselben durch ihre große Dauer hervor. Im großen und ganzen gilt vom Eiszeitalter dasselbe wie von der Gegenwart: Auf weiten Gebieten

<sup>1)</sup> Der derzeitige tektonische Erdzustand. Sitzungsberichte der Preuß. Akad. d. Wissenschaften. Phys.-Math. Klasse, 1935, XIII, S. 179.

<sup>2)</sup> Vergl. A n d r e w C. L a w s o n, San Francisco Folio. Geological Atlas of the United States. 1914. S. 14 und 16.

waren die tektonischen Bewegungen gering, oft kaum wahrnehmbar. An b stimmten Linien waren sie stark, hier herrschte tektonische Unruhe, im Gegensatz zu einer wohl nur scheinbaren tektonischen Ruhe an jenen anderen Stellen. Was damals unruhig war, ist es heute noch, und die damalige Unruhe setzt die früherer Zeiten fort; es wird schwer, hier nicht bloß pliozäne und quartäre Bewegungen, sondern auch pliozäne und quartäre Schichten zu trennen. Die echten strophischen Bewegungen des Eiszeitalters setzen ebenso wie dessen vulkanische Tätigkeit die des jüngsten Tertiärs fort und leiten in die der Gegenwart über. Damit soll aber nicht gesagt werden, daß eine ununterbrochene Kette der Vorgänge bestand; es kann als wahrscheinlich gelten, daß die tektonischen ebenso episodisch erfolgten wie die vulkanischen, daß sie mancherorts zu Ende gingen, wie es ja auch nicht an Anzeichen des Beginnes neuer fehlt. Sehr wohl ist möglich, daß sie ihren Ort veränderten. Hierüber wird sich erst Klarheit gewinnen lassen, wenn wir die Gesamtheit der Erscheinungen besser überblicken werden, als heute. Ob die tektonischen Bewegungen des Eiszeitalters durch dessen große epistrophische Bewegungen beeinflusst worden sind, wird sich erst entscheiden lassen, wenn wir von einem vorhergehenden Abschnitte der Erdgeschichte von gleicher Dauer die tektonische Geschichte in ähnlicher Weise überblicken können, wie die des Eiszeitalters, wenn wir die vorhergehenden Blätter des 500—1000 Blatt starken Bandes der Erdgeschichte zu lesen vermögen. *(Mitt. Jahrb.)*

Während des Eiszeitalters haben sich zu den nie ruhenden rein strophischen Bewegungen epistrophische gesellt. Wo das in den Gebieten der großen Inlandeismassen der Fall war, da waren die epistrophischen die maßgebenden; wir wissen wenig über die strophische Geschichte von Nordeuropa und dem nordöstlichen Nordamerika. In kleineren Gletschergebieten kommen die strophischen Bewegungen als tektonische mehr zur Geltung, so in den Alpen. Aber auch Anzeichen von epistrophischen fehlen hier nicht, wie wir gesehen haben. Daß die auf das Schwinden des Eises folgende Erhebung von dessen Unterlage unregelmäßiger erfolgte als in Nordeuropa, liegt auf der Hand; denn sie erfolgte in einem tektonisch noch unruhigem Gebiete.

Noch sind wir weit davon entfernt, das ganze Kapitel von Krustenbewegungen während des Eiszeitalters zu überblicken. Hier konnte nur versucht werden, herauszuschälen, daß sich manches auf eustatische Schwankungen des Meeresspiegels, anderes auf isostatische Bewegungen der Kruste und wiederum anderes auf deren stro-

phische Umbildungen zurückführt. Das Herausarbeiten des Anteils, den jeder dieser Vorgänge an der Entwicklung des ganzen hat, ist eine schöne und große Aufgabe für die Zukunft.

Die vorstehende Untersuchung schließt sich anderen an, die ich in Verfolgung meiner Eiszeitstudien namentlich in den letzten Jahren veröffentlicht habe. Wo ich auf sie und auf frühere Arbeiten Bezug nehme, geschieht dies durch Angabe der Jahreszahl des Erscheinens. Es handelt sich um folgende Schriften:

- 1882 Die Vergletscherung der Deutschen Alpen. Leipzig.  
 1908 Die Alpen im Eiszeitalter (im Verein mit Eduard Brückner). Leipzig 1901—1909.  
 1922 Die Terrassen des Isar-Tales in den Alpen. Ablagerung und Schichtstörung der letzten Interglazialzeit in den nördlichen Alpen. Glaziale Krustenbewegungen. Sitzgs.-Berichte d. Preuß. Akad. d. Wiss., Phys.-Math. Klasse. 1922. XIX, XX, XXIV.  
 Die letzten Krustenbewegungen in den Alpen. Geologiska Föreningens förhandlingar. Stockholm, 44. S. 607.  
 1924 Das Antlitz der Alpen. Naturwissenschaften, 12. Heft 47. Berlin.  
 1933 Eustatische Bewegungen des Meeresspiegels während der Eiszeit. Geographische Zeitschrift, S. 329.  
 1934 Theorie der Bewegung der Strandlinie. Sitzgs.-Berichte d. Preuß. Akad. d. Wiss., Phys.-Math. Klasse, XIX.  
 1936 Neue deutsche Hochgebirgsforschungen. Zeitschr. d. Gesellschaft f. Erdkunde, Berlin. S. 241.