

Die Entstehung der Alpen*.

Von Albrecht Penck in Berlin.

Die Alpen stehen inmitten Europas als ein Forschungsfeld von zwar beschränkter Gröfse, aber von unergründlicher Tiefe: je mehr in ihnen wissenschaftlich gearbeitet wird, desto mehr Probleme bieten sie dar. Alle Naturwissenschaften finden in ihnen reichliche Aufgaben. Aber nach keiner Richtung haben sie unsere Vorstellungen mehr beeinflusst, als auf dem Gebiet der Erdkunde, der Geographie und Geologie. Die meisten Theorien über Gebirgsbildung sind entweder in ihnen entstanden oder sind an ihnen erprobt worden, und unsere gesamte Kenntniss von den Hochgebirgen der Erde, ihrem Formenschatz und ihrer Entstehung beruht auf dem Boden der Alpenforschung.

Vor einem halben Jahrhundert noch erschienen uns die Alpen als ein Gebilde, entstanden durch senkrechte Hebung. Die Zentralgesteine, Granit und Gneis, sollten glutflüssig aus dem Innern der Erde hervorgegedrungen sein, und indem sie sich den Weg an die Oberfläche bahnten, sollten sie die hier befindlichen Schichten seitlich zusammengeschoben haben. — Dann lernten wir die Alpen kennen als ein großes Faltengebirge, entstanden durch seitliche Zusammenpressung der Schichten, wobei sich dieselben in ähnlicher Weise in Falten legten wie ein Stück Tuch, das man von der Seite her zusammenschiebt. Der dies verursachende seitliche Druck wurde zurückgeführt auf die Kontraktion des Erdkörpers, welcher ständig Wärme verliert und dabei sich in radiärer Richtung zusammenzieht. Die Kruste sollte sich dem schwindenden Kern anschmiegen, wobei sie sich auf engerem Raume zusammenpressen mußte. In den letzten Jahren nun haben sich diese Anschauungen geändert, und wir hören nunmehr, daß die Alpen nicht aus einzelnen Schichtfalten zusammengesetzt werden, sondern aus großen,

*) Vortrag, gehalten in der Allgemeinen Sitzung vom 7. Dezember 1907.

übereinander gelagerten Schubdecken von Gestein bestehen, welches in horizontaler Richtung viele Kilometer weit herangeschoben worden ist.

Diese neue Anschauung über den Bau der Alpen ist an ebenderselben Stelle entstanden, an welcher uns vor 35 Jahren gelehrt worden ist, daß das Gebirge im wesentlichen aus dichtstehenden Schichtfalten bestünde, nämlich im Bereiche der Glarner Alpen. Hier sieht man unten im Tal jüngere geologische Ablagerungen dicht zusammengeprefst in einzelne Falten. Die Berge aber bestehen aus älteren Schichten, welche verhältnismäßig flach gelagert sind. Die Ordnung der Dinge ist hier verkehrt. Überrascht schweift von mittlerer Bergeshöhe aus das geologisch geschulte Auge über ein eigenartiges Bild: es sieht oben das Alte und unten das Junge! Heim hat sich mit diesem Befund in seinen klassischen Versuchen über den Mechanismus der Gebirgsbildung eingehend befaßt, hat ihn durch zahlreiche Einzelbeobachtungen sichergestellt und eine Theorie über das Zustandekommen dieser absonderlichen Lagerungsverhältnisse aufgestellt, welche anfänglich durchaus befriedigte. Er dachte sich das ältere Gestein über das jüngere hinweggefaltet; über das Gebiet des heutigen Kanton Glarus sollte sich eine Gesteinsfalte von Süden her und eine andere von Norden her hinwegbewegen, welche beiden Falten mit ihren Scheiteln dicht aneinander gerieten. Das ist die bekannte Theorie von der Glarner Doppelfalte.

Heims Darlegungen haben lebhaftere Erörterungen ins Leben gerufen. Zunächst wurden Zweifel an der Richtigkeit der Beobachtungen geäußert. Es wurde bestritten, daß ältere Gesteine auf jüngeren lagerten und behauptet, daß die Bergfirste auf einem eigenen Sockel von anderem Material ständen, als in den Tälern entgegentritt. Siegreich ist Heim allen diesen Bedenken entgegengetreten, und ich selbst habe mich durch wiederholte Besuche des Bereiches der Glarner Alpen überzeugt, teils unter Führung von Heim, teils allein, daß ganz zweifellos ältere Schichten über jüngeren lagern und über diese hinweggeschoben sind. Dies gilt nunmehr in der gesamten wissenschaftlichen Welt als anerkannte Tatsache und hat ungemein befruchtend auf die Auffassung zahlreicher, sonst schwer verständlicher Lagerungsverhältnisse gewirkt. Man erschrickt nun nicht mehr, wenn man ältere Gesteine auf jüngeren findet, und sucht dies nicht mehr durch die gewagtesten Erklärungsversuche hinwegzuleugnen. Aber allmählich entstanden Zweifel, ob die von Heim gegebene Erklärung für das Zustandekommen der absonderlichen Lagerungsverhältnisse im Kanton Glarus zutreffend sei, und der Franzose Marcel Bertrand stellte die Ansicht auf, daß der Gesamtumfang dessen, was Heim an Beobachtungs-

material kennen gelernt hat, auch durch die Annahme einer einzigen, ganz riesigen Falte erklärt werden kann, durch welche von Süden her die älteren Gesteine vom Rhein-Tal aus bis an das Gebiet des Säntis über die jüngeren hinweggeschoben sein sollten, also über eine Fläche von mehr denn 30 km Breite. Dieser Erklärungsversuch fand anfänglich keine grössere Beachtung. Die Tatsachen, die er zu erklären suchte, waren zu neu und überraschend; nur allmählich lebte man sich in den Gedanken ein, sie durch zwei Falten von ansehnlichen Mafsen zu erklären; sie auf eine einzige grofsartige Falte zurückzuführen, lag zunächst keine zwingende Veranlassung vor.

Aber allmählich wurden weitere neue Tatsachen bekannt. Sie ergaben sich bei der genauen geologischen Durchforschung des Gebirges beiderseits des Austritts der Rhone aus den Alpen. Hans Schardt zeigte, dafs hier ein ganzes Gebirge auf jüngeren Schichten schwämme und über diese von Süden her hinweggeschoben sein müsse. Lugeon versuchte zunächst einen anderen Erklärungsversuch, analog dem von Heim für die Glarner Doppelfalte gegebenen. Er glaubte, dafs das Gebirge des Chablais aus der Tiefe aufgepreist und pilzförmig in Gestalt zweier Falten nach Norden und Süden übergequollen sei. Er stellte der Theorie der Doppelfalte von Heim jene der Pilzfalte zur Seite. Aber bald überzeugte er sich, dafs die Auffassung von Schardt auch für sein Gebiet zuträfe, und dafs die Alpen des Chablais gleich den Préalpes Romandes des Kanton Freiburg gewaltige Schubmassen darstellten, welche von Süden her sich über jüngere Ablagerungen hinweggeschoben haben. Nunmehr fand auch der Erklärungsversuch, den Marcel Bertrand für die Glarner Alpen gegeben, mehr und mehr Anhänger. Ich selbst versuchte im Jahre 1899, mir ein eigenes Urteil in dieser Sache durch einen erneuten Besuch der Glarner Alpen zu bilden. Dabei leiteten mich folgende Erwägungen: Wenn ein mächtiger Gesteinskörper über einen anderen hinweggeschoben wird, dann mufs es an der Grenze zwischen beiden charakteristische Erscheinungen geben, welche ermöglichen, die Richtung des Schubes zu bestimmen. Das untere festliegende Gestein mufs vom bewegten an der Grenze fortgeschleppt werden; seine Schichten müssen in der Richtung der stattgefundenen Bewegung umgebogen sein. Traf nun Heims Auffassung über den Bau der Doppelfalte, der ich noch 1897 beigepflichtet hatte, zu, und lagen zwei verschiedene Faltungsüberschiebungen, die eine von Süden und die andere von Norden her, vor, so mufste unter beiden sich das jüngere Gestein verschieden verhalten: es mufste unter der südlichen Falte nach Norden und unter der nördlichen Falte nach Süden geschleppt worden sein. Nach der Auffassung von Marcel Bertand

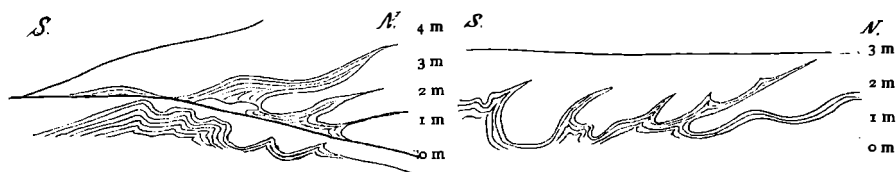
hingegen mußte es im Gesamtbereich der Glarner Überschiebungen in ein und derselben Richtung, nämlich nach Norden hin, geschleppt worden sein. So lag der Entscheid der Frage auf dem Nordflügel der Glarner Überschiebungen. Mein Freund Heim nannte mir hier eine Stelle, welche zur Vornahme einschlägiger Untersuchungen besonders geeignet war, wo man nämlich die Grenze zwischen dem überschobenen Gestein und ihren Unterlagen recht deutlich sah. Sie liegt im Kärpf-Tal, welches oberhalb Glarus in das Linth-Tal mündet und im wesentlichen in das aufgeschobene ältere Gebirge eingeschnitten ist, aber an einigen Stellen durch dasselbe hindurch in die unterlagernden jüngeren Gesteine reicht, sodafs man hier wie durch ein Fenster in die Unterlage der Schubdecke hineinblicken kann. Die Schubdecke selbst besteht aus dem sogenannten Verrucano, einem Gestein vom Aussehen und ungefähren Alter des deutschen Rotliegenden. Darunter liegt ein eigenartiger Kalk; Heim hat ihn als einen Repräsentanten jener mächtigen Jurakalkmassen erkannt, welche die Schweizer Kalkalpen aufbauen; dieselben sind bei der Überschiebung durch den Verrucano ausgewalzt worden. Das ist der Lochseitenkalk; darunter liegen an der Kärpf-Brücke die alttertiären Schiefer des Kanton Glarus. An der Grenze von Kalk und Schiefer verschwindet der Bach eine Strecke weit von der Oberfläche und fließt durch eine kleine Höhle, über welche sich die „Kärpf-Brücke“ spannt. An den Wandungen dieser kurzen natürlichen Brücke, in die von beiden Seiten her das Tageslicht eindringt, kann man deutlich die Schlepplungserscheinungen der Glarner Schiefer erkennen. Der erste Blick verwisserte mich davon, dafs die Auffassung des kürzlich verstorbenen französischen Geologen Marcel Bertrand zutrifft, und dafs auch in den nördlichen Glarner Alpen im Bereich der Nordfalte Heims die Massen von Süden nach Norden und nicht, wie es im Sinn der Theorie der Doppelfalte zu erwarten wäre, von Norden nach Süden geschoben worden sind. Nach Norden hin sind die Flyschschichten geschleppt und reichen wie Flammen in den sie überragenden Lochseitenkalk hinein, so wie es unsere Skizze Abbild. 1 und 2 zeigt. Auf Grund ebenderselben Argumente hat bald darauf Heim die Theorie der Doppelfalte zugunsten der Anschauung Bertrands aufgegeben, und er hat kürzlich in einer prächtigen Monographie gezeigt, dafs das Säntis-Gebirge die Stirnseite der gewaltigen Überschiebung darstellt, wo die Schichten stark zusammengefaltet und zusammengestaut sind.

Die grofse Glarner Überschiebung ist nicht identisch mit der der Freiburger Alpen und des Chablais. Letztere erstreckt sich vielmehr in ihren Ausläufern über sie hinweg und stellt eine zweite grofse Schubdecke dar; eine dritte liegt weiter östlich von den Glarner

Alpen, wo der gewaltige Gebirgsstock des Rhätikon als wurzellose Schubdecke von Gestein über jüngeren Schichten gleichsam schwimmt. Der Aufbau der schweizerischen Alpen erscheint hiernach als ganz wesentlich anders, als wir ihn uns früher vorstellten. Dachten wir früher, daß lediglich einzelne Gesteinsfalten vorlägen, wie uns solche im Schweizer Jura so sehr anschaulich entgegentreten, so sehen wir heute, daß die schweizerischen Alpen aufgebaut werden aus einzelnen Gesteinsdecken, die von Süden her gewandert sind. Die gewaltigen Schichtfaltungen, welche wir ebenso im Säntis-Gebirge, wie an der Axen-Straße bewundern, sind aber nichts anderes als Begleiterscheinungen der Schübe, bestehend in Windungen und Biegungen der geschobenen Massen oder in Stauchungen der ihnen vorgelagerten Schichten. Bis tief in das Innere des Gebirges hinein ist diese eigenartige, überraschende Struktur nachgewiesen. Die Ausführung des Simplon-Tunnels gewährt ihr neue Stützen. Daß der Bau dieses

Abbild. 1.

Abbild. 2.



Flammen der Eocänschiefer im Lochseitenkalk am unteren Ende der Käpffbrücke. Abbild. 1 linke Seite; Abbild. 2 rechte Seite. (Eocänschiefer schraffiert, Lochseitenkalk weiß; starke Linien: Schubflächen.)

Tunnels außerordentlich viel größere Schwierigkeiten zu überwinden hatte, als vorausgesehen wurde, erklärt sich daraus, daß er Schichten durchfahren hat, die nach unserer älteren Vorstellung vom Bau der Alpen hoch oben liegen sollten, feste Gneise überspannend, während sie tatsächlich unter denselben gelagert sind, von denselben überschoben.

Was für die Schweiz durch sehr sorgfältige Untersuchungen nunmehr als sichergestellt gelten kann, hat man auch für die Ostalpen bereits nachzuweisen versucht. Mehrfach ist ausgesprochen worden, daß auch dieser Teil des großen Alpengebirges aus einzelnen übereinandergeschobenen Schubdecken bestünde; der Nachweis ist allerdings im einzelnen noch nicht geglückt. Kürzlich erst hat ferner Uhlig zu zeigen unternommen, daß die gesamte Summe von Erscheinungen des Gebirgsbaues der Karpathen, der vor wenigen Jahren erst noch auf einfache Faltungen zurückgeführt ward, ebenso befriedigend durch die Annahme großer Schubdecken erklärt werden kann. Spuren von

solchen hat man auch im Appennin, auf Sizilien, sowie auch auf dem Dinarischen Gebirge nachweisen wollen. Mag nun hier auch manchmal die Phantasie der tatsächlichen Interpretation vorausseilen, und ist jedenfalls noch auferordentlich viel Arbeit zu leisten, bis die Schubdecken in den genannten Gebirgen mit ähnlicher Sicherheit nachgewiesen sein werden, wie für die schweizerischen Alpen, so veranlassen uns die hier klar erkannten Beobachtungstatsachen schon ganz wesentlich, unsere Vorstellung von der Entstehung der Gebirge zu ändern.

Wir hatten uns früher vorgestellt, die Gebirge seien unmittelbar unter dem gewaltigen Seitendruck der Erde entstanden. Wir dachten uns die Schichten des Gebirges gleichsam zwischen die Backen eines Schraubstockes gelagert, welcher zusammengeschraubt wird, wobei sich die Schichten in Falten legen müssen. Eine derartige Vorstellung macht uns das Auftreten von Schubdecken, wie wir deren drei in den schweizerischen Alpen nunmehr kennen, keineswegs verständlich. Eine Glarner Schubdecke, die in der Mächtigkeit von einigen hundert Metern 30 km weit wandert und sich dann hier zu einem gewaltigen Faltengebirge zusammenstaut, kann nicht die unmittelbare Folge eines in der Erdkruste herrschenden Seitendruckes sein. Sie liegt nicht zwischen zwei Backen eines Schraubstockes, welche sich annähern, sondern erscheint als eine frei bewegte gleichsam geflossene, verhältnismässig dünne Gesteinslage. Eine solche Bewegung kann man sich sehr schwer als Folgeerscheinung eines einseitig wirkenden Druckes vorstellen. Vor einem solchen würde sich eine derartige Gesteinsdecke unmittelbar zusammenbäumen und in grosse Falten legen, und solches würde nicht erst in einer Entfernung von 30 km vom Ursprunge der geschobenen Massen geschehen, wie wir dies im Säntis sehen. Eher könnte man an einen Zug denken, welcher die Massen in Bewegung setzte, bis sie sich an einem Hindernisse stauten.

In dieser Richtung bewegen sich die Vorstellungen, die sich nunmehr aufdrängen. Man begegnet ihnen gelegentlich in der Literatur, in der hauptsächlich allerdings die Struktur der Schubdecken besprochen und selten nur in die theoretische Erwägung ihrer Entstehung eingetreten wird. Wenn dies aber geschieht, so spricht man von einem Abgleiten der Schubdecken, so erst kürzlich Schardt und Karl Schmidt in Basel. Nun hat uns Reyer längst gezeigt, dafs wir die Entstehung von Schubdecken und von Falten durch einen Gleitvorgang erklären können. Nehmen wir an, es bilde sich aus irgend einer Ursache eine riesige Falte der Erdkruste, ein breiter Streifen sinke zu sehr grosser Tiefe herab und daneben erhebe sich ein Nachbarstreifen zu ansehnlicher Höhe. Verbindet sich mit dem also entstandenen Höhenunterschiede ein gewisses

Mafs von Steilheit, so müssen sich die erhabenen Massen in Bewegung setzen und in die Tiefe abgleiten, so wie wir dies in den Rutschungen an übersteilen Talgehängen wahrnehmen. Die abgeglittenen Massen werden sich an ihrem Aufsensaume in Wülste zusammenlegen, wie wir solche ja am Rande der Ablagerungsgebiete von großen Bergstürzen antreffen, und eine bogenförmige Anordnung zeigen, wie sie beispielsweise die Alpen des Chablais und die Freiburger Voralpen haben. Die Schubdecken werden hiernach vergleichbar mit Abrutsch- und Abbruchmassen am Fusse von Talgehängen, mit der Schneedecke eines Daches, die abrutscht und sich in Falten legt, und sind im Grunde genommen auf dieselbe Ursache zurückzuführen, nämlich auf den Zug der Schwere, welche übersteile Massen in die Tiefe zieht. Nur würde ein Unterschied in den Bedingungen obwalten, welche die gewöhnlichen Bergstürze und Rutschungen ins Leben rufen. Diese knüpfen sich an kleine, übersteile Hänge, die vielfach durch das Einschneiden von Flüssen, von Gletschern und die Tätigkeit der Brandung verursacht sind, während die Abgleitvorgänge, die zur Bildung von Schubdecken führen, gewaltige größere Bewegungen der Erdkruste zur Voraussetzung haben.

Sind die Schubdecken im Grunde genommen Gleitdecken, so müssen sie mit großen Gleitflächen in Verbindung stehen, auf welchen sich ganze Gesteinskörper bewegt haben und auf welchen im Wurzelgebiete der abgeglittenen Massen auch eine ausgedehnte Bloslegung von Gestein durch das Abgleiten stattgefunden hat. Einige Schweizer Geologen haben geäußert, daß die Sedimentdecke von den Schweizer Zentralalpen nicht durch die Gewässer abgetragen, denudiert, sondern durch Abgleiten entfernt worden sei. Der gleiche Gedanke läßt sich auch für die zentralen Ostalpen anwenden. Daß diese von Schichten der Kalkalpen bedeckt gewesen sind, ist mehrfach bereits ausgesprochen worden; und in der Tat, wenn man die in den nordtiroler Kalkalpen mächtig zusammengestauten Schichten des Wettersteinkalkes sich wieder ausgeglättet denkt, so bilden sie eine bis tief in die Zentralalpen reichende Decke. Allerdings ist hierbei gedacht, daß sie über einer festen Unterlage zusammengestaut sind, welche von der Zusammenstauung nicht betroffen wurde. Eine solche Annahme erscheint aber, wie ich vor 10 Jahren andeutete¹⁾, als gerechtfertigt: wäre auch die Unterlage der nördlichen Kalkalpen so stark zusammengepreßt, wie ihre Kalkschichten, so müßten sie ihre Umgebung viele Kilometer

¹⁾ Geomorphologische Probleme aus Nordwest-Schottland. Zeitschr. d. Gesellschaft. f. Erdkunde zu Berlin 1897. S. 146.

hoch überragen. Man hat die Entfernung der Kalkalpenschichten von den Zentral-Alpen gewöhnlich der Denudation zugeschrieben; allein der Umstand, daß Fetzchen von ihnen, die da und dort erhalten sind, starke mechanische Veränderung erfahren haben, daß der Kalk in Marmor verwandelt und der Dolomit in auffälliger Weise gestreckt worden ist, verrät, daß die Kalkalpenschichten nach ihrer Ablagerung und vor ihrer Entfernung noch starken Pressungen ausgesetzt waren, für welche uns die Denudationstheorie keinen Aufschluß gewährt, die aber als Begleiterscheinungen des Abgleitens verständlich sind. So hat denn die Annahme, daß die ursprüngliche Oberfläche der Zentral-Alpen teilweise wenigstens eine riesige Gleitbahn darstellt, manches für sich. Vielleicht erklärt sich daraus auch, daß die Anlage ihres Talnetzes so wesentlich von der der Kalkalpen abweicht. Unter allen Umständen muß aber erwogen werden, daß es neben den Gesteinsentblösungen durch eine tiefgreifende Abtragung, sei es durch die atmosphärischen Gewässer, sei es durch die Brandungswoge, noch solche geben kann, die auf einem Abgleiten von Schichten beruhen und verglichen werden können mit der Oberfläche eines Daches, die bei Schnee zum Vorschein kommt dann, wenn die Schneedecke abrutscht.

Allein wenn auch die ursprüngliche Oberfläche der Zentral-Alpen aus mannigfachen Ursachen als Abgleitfläche angesehen werden darf, so entbehrt sie doch eines, nämlich des Gefälles einer solchen. Sanft dacht sie sich nach den Kalkalpen ab; der große Höhenunterschied fehlt, den wir als Ursache des Abgleitens ansehen. Aber auch die Gleitdecken liegen nicht, wie sie sollten, in der Tiefe, sondern bilden ganze Gebirge. Unverkennbar haben sie eine nachträgliche Hebung erfahren. Von allen Beobachtern, die sich mit ihnen näher beschäftigt haben, wird hervorgehoben, daß sie sich nicht mehr in ihrer ursprünglichen Lage befinden, sondern spätere Störungen erlitten haben. Man spricht sogar von einer nachträglichen Faltung, welche manche Schubdecken erkennen lassen.

Hiernach kann das Fehlen der großen Gleitböschung nicht mehr überraschen. Sie mußte bei der Hebung der abgeglittenen Massen zerstört werden. Diese Hebung aber ging Hand in Hand mit einer Senkung des heutigen Alpenvorlandes. Der Gesamtmechanismus der alpinen Schichtstörungen erscheint uns daher als das Fortschreiten einer gewaltigen Krustenfalte in Raum und Zeit. Sobald sie Abfälle von entsprechender Steilheit geschaffen hat, gleiten die gehobenen Massen in die sich einsenkende Tiefe. Allmählich rückt das Maximum der Erhebung in das Gebiet der früheren Senkung hinein und hebt die dahinein abgeglittenen Massen empor; vor diesen aber sinkt ein neues Vorland ein; entsteht dabei abermals ein Steilabfall, so können die

emporgehobenen, vorher abgeglittenen Massen weiter wandern, in die neue Vertiefung gleiten und sich hier abermals zusammenstauen. So wird uns der eigenartige Bau der nördlichen Alpen verständlich, der uns deutlich erkennen läßt, wie sich Zone an Zone schmiegte, und das Gebirge nicht in einem Gusse, sondern polygenetisch im Sinne v. Richthofens entstand; so auch wird uns begreiflich, daß die Schubdecke der Freiburger Voralpen noch weiter glitt, als ihr Ursprungsgebiet bereits Zerstörungsprozessen ausgesetzt war. Sie haben sich über die Molasseschichten der Nordalpen geschoben, während die gleichalterigen Molasseschichten am Südfuße der Alpen mit Material aus ihrem mutmaßlichen Wurzelgebiete aufgebaut wurden. Dieses muß also bereits den Atmosphären ausgesetzt gewesen sein, als sie noch fortglitten. Denken wir uns eine also fortschreitende Grundfalte, deren Wulst in die davorgelagerte Senke jeweils abgleitet, dann dürfen wir nicht mehr, so wie es gelegentlich geschehen, uns vorstellen, daß zwischen der uns noch vorliegenden Gleitdecke und ihrer Wurzelstätte jeweils eine zusammenhängende Falte vorlag, und der Betrag der Kompression innerhalb der Alpen wird ganz erheblich geringer, als noch kürzlich von ausgezeichneten Geologen berechnet worden ist. Damit würden aber Werte schwinden, welche theoretische Bedenken gegen die Annahme der neuen Ansichten über die Struktur der Alpen ins Feld geführt werden könnten.

Wir wollen nicht weiter ins Einzelne gehen und nur noch bemerken, daß unsere Auffassung über die Entstehung der alpinen Schubdecken als herabgeglittene Massen keine radikale Lösung des Problems der Überschiebungen überhaupt bedeuten soll; sie gilt zunächst nur für den einen Fall, den wir hier ins Auge fassen, und halten wir für wahrscheinlich, daß sie auch für andere Fälle anwendbar sein wird, so sind doch die Probleme, welche die Überschiebungen stellen, zahlreich genug, um auch andere Lösungen zu verlangen. Der springende Punkt in unserer Auffassung ist: Die starke Schichtfaltung, der wir da und dort in den Alpen begegnen, erscheint uns nicht als das Wesentliche für die Entstehung des Gebirges, sondern lediglich als die Folgeerscheinung eines größeren Vorganges. Zu dieser Annahme leitet uns vor allem die Erwägung, daß die starken Zusammenpressungen der Schichten sich nur in der Tiefe gebildet haben können. Wenn sie nun heute hoch liegen, so muß nach ihrer Zusammenstauung noch eine Hebung stattgefunden haben. Letztere ist es, der wir das Gebirge als Aufragung danken, welche ermöglicht, daß die Gewässer sich eintiefen und aus der plumpen Erhebung den reizvollen Wechsel von Berg und Tal herauschneiden. Es haben sich feste Anhaltspunkte dafür ergeben, daß die Hebung

noch fort dauerte, als der Zerschneidungsvorgang schon sehr weit vorgeschritten war. Dies ergibt sich nicht aus dem inneren Bau, sondern aus dem Formenschatz des Gebirges. Geomorphologische Betrachtungsweise hat uns den neuesten Einblick in die Entstehung der Alpen ermöglicht. Allenthalben sehen wir alte Talböden hoch über den Sohlen der heutigen Täler. Sie vergewissern uns, daß die Täler durch lange Zeit in einem wenig eingeschnittenen Zustande verharreten, und dieser hat sich auf der West- und Südseite des Gebirges näher datieren lassen. Hier zeigt sich, daß die alten Talböden schliesslich in das Niveau der neueren Tertiärablagerungen verlaufen, die den Westen der Alpen umsäumen. Dadurch werden sie als pliocän erwiesen. Unsere pliocänen Talböden nun aber liegen ebensowenig mehr ungestört da, wie die Pliocänschichten; sie sind gleich letzteren am Alpensaume aufgebogen, während sie in der Alpenmitte, soweit sich sehen läßt, noch ihr ursprüngliches Gefälle zeigen. Seit ihrer Entstehung muß sich der ganze Westen der Alpen bis ins Etsch-Gebiet hinein um Hunderte von Metern aufgewölbt haben. Gleichzeitig mit dieser Aufwölbung erfolgt im Süden die Einsenkung der Po-Ebene. Dieselben marinen Pliocänschichten, welche am M. S. Bartolomeo bei Salò 500 m über dem Spiegel des Garda-Sees lagern, erreichen im Hügel von Castenedolo südöstlich von Brescia nur noch 140 m Höhe und sind in Cremona 200 m unter dem heutigen Meeresspiegel noch nicht angebohrt worden. Dabei handelt es sich um Ablagerungen, entstanden in seichtem Wasser. Von Salò an biegen sie um mehr als 700 m in die Tiefe, die zugehörige Aufwölbung der Alpen ist ferner 200 - 300 m; auf mehr als 1000 m beläuft sich das Gesamtausmaß der riesigen postpliocänen Falte am Südrande der Alpen, die möglicherweise zu einem Abgleiten von Teilen der Alpen zu der Po-Ebene hin führt.

Die damit verbundene Hebung der Alpen hat noch in der letzten Phase des Eiszeitalters angedauert. Im Mündungsbereich zahlreicher Alpentäler treffen wir die Deltas von früheren Alpenseen, welche sich hoch erheben über den Spiegel der heutigen Alpenseen und auf Wasserstände weisen, die unter Annahme der gegenwärtigen Höhenverhältnisse ganz unerklärlich sind. Es fehlt an der Talmündung die Möglichkeit, die Wasser entsprechend zu spannen. Anfänglich habe ich geglaubt, daß hier bedeutende Moränenmassen existiert hätten, die der Abtragung zum Opfer gefallen sind; allein die häufige Wiederkehr derselben Erscheinung hat den Glauben erschüttert, daß sie durch bloße lokale Ursachen erklärt werden könnte; ich erblicke in ihr heute das Ergebnis einer allgemein wirkenden Ursache, nämlich der anhaltenden Aufwölbung

der Alpen, wodurch die gebirgswärts liegenden Deltas stärker gehoben worden sind, als die gebirgsauswärts befindlichen Partien.

Die breiten, hochgelegenen pliocänen Talböden der Alpen geben uns die Möglichkeit an die Hand, das Aussehen des Gebirges zur Zeit ihrer Entstehung zu rekonstruieren. Die Grundform der Berge, die sich aus ihnen erheben, ist die von Domen oder Heuschobern, die von Rundling-Gipfeln mit nicht allzu steilen Gehängen. Sie haben sich namentlich in jenen Teilen der Ostalpen erhalten, welche von der eiszeitlichen Vergletscherung nicht betroffen worden sind, besonders im Berglande zwischen Etsch und Brenta-Tal, sowie in den Steirischen Alpen südlich der Mur und Mürz. Auch in den Vorbergen der Monte Rosa-Gruppe, die sich mälsig über die Po-Ebene erheben, kehren sie wieder, und hier sind sie verknüpft mit außerordentlich tiefgründig verwittertem Gestein. Es sind die Züge eines höheren Mittelgebirges, die uns die Alpen der Pliocän-Epoche darbieten, eines Gebirges, das langanhaltenden Zerstörungenprozessen ausgesetzt gewesen ist. Wenn sie nun heute tiefeingeschnittene Täler aufweisen mit häufig steilen Formen, so ist dies nicht allein der postpliocänen Hebung des Gebirges zuzuschreiben, deren bedeutenden Betrag wir kennen gelernt haben, sondern in erster Linie den eiszeitlichen Gletschern, welche sich zu wiederholten Malen, soweit wir wissen, viermal in den großen Alpentälern bis zum Fuß des Gebirges ausgedehnt haben. Sie schufen sich Betten, wie sie für ihre Dimensionen paßten, und schnitten in den großen Tälern tiefe Furchen ein, die für die heutigen Flüsse zu tief sind. Die großen Alpenseen liegen größtenteils am unteren Ende der übertieften Talstrecken, die weiter oberhalb nicht, so wie die in Fortbildung begriffenen Täler, von den Flüssen weiter vertieft, sondern verschüttet werden. Heim hat hierauf die Aufmerksamkeit gelenkt und aus der Verschüttung der großen Alpentäler geschlossen, daß die Alpen, nachdem sie emporgefaltet waren, so eingesunken seien wie die Zusammenpressung der Eisdecke eines Sees, die in dem Mafse, wie sie durch seitlichen Zusammenschub emporwächst, infolge ihres Gewichtes mitsamt den angrenzenden Eispartien einsinkt. Aber wenn man in den großen Alpentälern zur Not die Formen von versunkenen Tälern erblicken könnte, in den zugehörigen Talsystemen ist es unmöglich. Nicht sind, wie man erwarten sollte, Haupttal und Nebental versunken, sondern jenes ist gegenüber diesem übertieft, und letzteres mündet stufenförmig gegen ersteres. Auch können wir im Verlauf der alten Talböden nicht ein Einsinken, sondern ein Aufwölben der Alpen erkennen.

Die eiszeitlichen Gletscher haben nicht blofs die Täler, sondern auch die Gipfel der Alpen umgestaltet. Sie haben sich gleichsam ein-

gefressen in die Gehänge der alten Rundling-Berge, haben hier Kare eingetieft, zwischen denen vielfach nur schmale Kämme stehen geblieben sind. Diese Grate, die wir als bezeichnend für die Hochgebirgsformen nehmen, sind also ein Werk der Eiszeit, die die Formen des Gebirges verjüngt, aus den plumpen Heuschobern Spitzen herausgeschnitten hat. So erscheinen die Hochgebirgsformen nicht, wie man anfänglich anzunehmen geneigt war, als das unmittelbare Ergebnis der konvulsivisch vollzogenen Erhebung des Gebirges, sondern als späte Skulptur, herausgearbeitet aus unansehnlich gewordenen Blöcken, und letztere betrachten wir als das Ergebnis einer langanhaltenden Abtragung einer großen, langsam vorwärtsschreitenden Grundfalte, von der sich die übersteilen Teile abschuppten, in die Tiefe glitten und schließlich beim Vorwärtsschreiten der Falte wieder emporgehoben wurden.

Die Struktur der Alpen gestaltet sich weit verwickelter, als wir noch vor kurzem glaubten, und fast jeder Tag bringt neue Entdeckungen. Gewagt mag es daher erscheinen, sie jetzt schon erklären zu wollen. Aber jede genetische Hypothese eröffnet neue Perspektiven für die Forschung. Indem wir nicht mehr in den einzelnen Schichtfalten das Wesentliche in der Gebirgsstruktur erblicken und zu scheiden versuchen zwischen einem allgemein wirkenden Grundvorgang, der Bildung einer riesigen, fortschreitenden Grundfalte, und sekundären Vorgängen, Abgleiten u. s. w., gewinnen wir einen Anhaltspunkt, durch vergleichend geographische Methode die einzelnen Phasen in der Entstehung der Alpen klarer zu verstehen. Wir kennen auf der Erdoberfläche untermeerische Abfälle von außerordentlicher Steilheit am Aufensaume der Festländer; Kabel, die an ihnen herabgelegt worden sind, zerreißen häufig, und zwar, wie wiederholt schon gesagt, infolge von Rutschungen. Sind dieselben vielleicht die Seitenstücke zum Abgleiten alpiner Schubdecken? Wir kennen am Boden der Ozeane tiefe, schmale Einsenkungen, vergleichbar dem Wellentale einer großen Grundfalte; wir nennen sie gewöhnlich Gräben, obwohl wir nicht den leisesten Anhalt dafür haben, daß sie ebenso durch Einbruch entstanden sind wie der große Rheintal-Graben zwischen Schwarzwald und Wasgau. Nahe diesen ozeanischen Gräben von 6—9 km Tiefe erhebt sich vielfach wulstförmig der Sockel einer Inselguirlande. So ist das Relief im westlichen Stillen Ozean, das die zum Zwecke der Kabellegung ausgeführten Lotungen namentlich zwischen den Karolinen und Liu-Kiu-Inseln erschlossen. Schott und Perlewitz¹⁾ geben von ihm ein schema-

1) Lotungen I. N. M. S. „Edi“ und des Kabeldampfers „Stephan“ im westlichen Stillen Ozean. Archiv d. Deutschen Seewarte XXIX, No. 2, 1906.

tisches Profil, welches eine solche Grundfalte zeigt, wie sie nach unserer Auffassung der Entstehung der Alpen zugrunde liegt: da ist der Wulst neben dem Vorlandgraben, und zwischen beiden gibt es Böschungen von $12-19^\circ$, von 200‰ — 330‰ ! Haben wir es hier mit der ersten Phase der Entstehung eines Gebirges vom Typus der Alpen zu tun? Sollte uns die Tiefseeforschung ebenso neue Aufschlüsse über die ersten Anfänge der Alpenentstehung gewähren wie das genauere Studium des heutigen Formenschatzes des Gebirges über die letzten Phasen seiner Entwicklung? So drängen sich uns immer neue Fragen auf, deren Beantwortung wir abwarten müssen, bevor wir zum Verständnis jenes Mechanismus gelangen, welcher zur Entstehung einer Grundfalte führt.
