

## Über die Entstehung der Hochgebirgsformen in den Ostalpen Von Otto Ampferer

Die Alpen sind heute nach mehr als hundertjähriger Durchforschung ein Gebirge, das keine unbekanntem Täler und Berge enthält.

Eine Reihe von sorgfältigen Kartenwerken aller an ihrem Besitze beteiligten Staaten gibt uns über den gesamten Formeninhalt der Gebirge in allen möglichen Darstellungsweisen eingehenden Bericht.

Daneben besitzen wir in den Karten des Alpenvereins Einzelausschnitte von den verschiedenartigsten Gebirgsgruppen, die in stetiger Verbesserung zu der heuer erscheinenden Dachsteinkarte geführt haben, die wohl als die feinst durchdachte und gezeichnete Gebirgskarte der Gegenwart zu bezeichnen ist.

Was aber wegen der Kleinheit des Maßstabes in diesen ungeheuren Formenregistern nicht verzeichnet steht, haben Hunderttausende von Photographien aufgenommen, die über die ganze Kulturwelt verbreitet sind. Von einer Reihe der schönsten Gebirgsgruppen stehen uns außerdem ausgezeichnete Reliefs zur Verfügung, die eine Zierde der meisten Museen Europas bilden.

Im Verhältnis zur geographischen Erforschung hat die geologische nicht nur wesentlich später begonnen, sondern auch einen viel langsameren Fortschritt genommen. Es liegt dies einerseits in den viel schwierigeren und mühsameren Arbeitsmethoden, anderseits darin, daß hier jenes mächtige militärische Interesse fehlt, das die geographischen Kartenaufnahmen allzeit am wirksamsten unterstützte.

Trotz dieses umfangreichen Materials, das über die äußeren Formen und die innere Struktur des Alpengebirges vorliegt, kann man nicht behaupten, daß die Untersuchungen über die Entstehung dieser Formen bereits überall zu sicheren Anschauungen geführt hätten.

Wenn wir nun das Feld dieser Untersuchungen betreten, haben wir uns zunächst mit der Frage nach der Entstehung der Reliefformen im allgemeinen zu beschäftigen.

An der Oberfläche unseres Planeten gibt es in strengem Sinne keinen Ort, an dem nicht Zerstörungen und Abtragungen stattfinden könnten. Selbst am Grunde des tiefen Meeres können langsame Strömungen sich einstellen und auf einer völlig gefällslosen Ebene vermögen die Winde noch Furchen und Löcher auszufegen.

Stellen wir aber nur die lebhafteren Veränderungen in unsere Rechnung ein, so scheidet die Bedeckung mit stehendem Wasser im allgemeinen die Gebiete der Abtragung, die sich über das Meeresniveau erheben, von jenen der Auffpeicherung, die darunter liegen.

Was über den Meerespiegel aufragt, gehört ins Reich der Besonnung. Hier wechselt Licht und Dunkel, Kälte und Wärme und damit wogt in ewiger Anrast die Luft-hülle darüber; unaufhörlich steigt und fällt der Wasserdampf, der dem Meer von Bächen, Flüssen, Strömen und den Gletschern ihre Nahrung spendet.

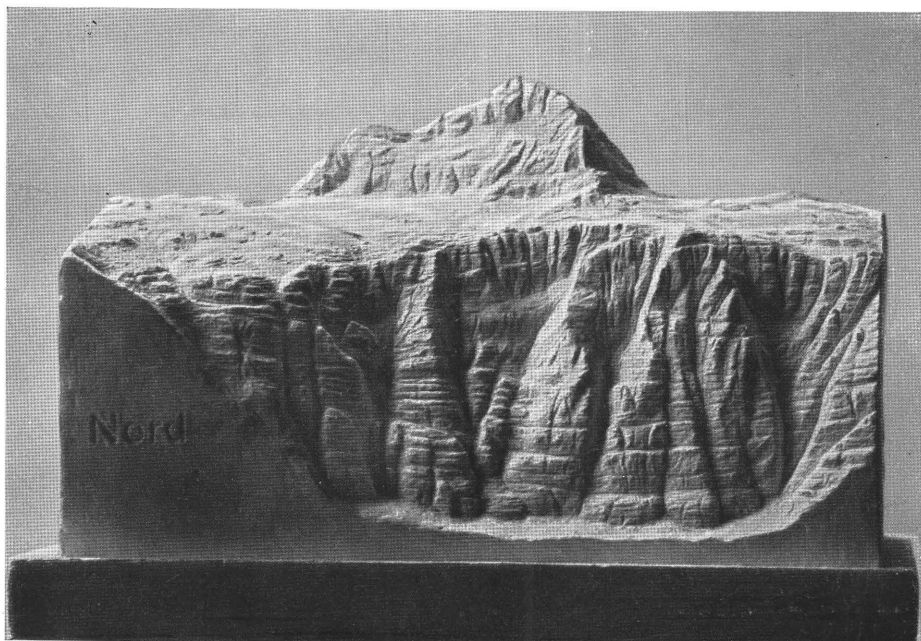
Die Sonne aber lenkt und treibt mit ihren stillen Strahlen alle diese Riesenmaschinen, zu denen sich noch der Drehring der Mondflut gesellt und deren Arbeit in der Abbrechfelung und Polsterung aller Rauhigkeiten der Erdkugel besteht. Da indessen die Gewalten im Innern der Erde periodisch immer wieder in neuen Hebungen und Senkungen der Oberfläche ihr Leben verkünden, so findet dieses großartige Ballspiel wohl noch lange keine Ende.

Gehen wir nun genauer auf die Arbeitsweise des rinnenden Wassers ein. Da wir



Otto Ampferer phot.

Abb. 1. Grundmoräne bei Boden im Lechtal



Relief von Hans Rohn

Abb. 2. Relief des Triglavs



Richard Müller in Innsbruck phot. 1.

Abb. 3. Innfalterrassen bei Zirl



S. Rohrer phot.

Abb. 4. Inn Schlucht zwischen Koppen und Imst

für unsere Betrachtung von der Windwirkung absehen können, so haben wir zu bedenken, daß dafür Gefälle und Wassermenge die entscheidenden Bedingungen sind.

Für die Anlage eines Talnetzes sind daher die Form der Erhebung und die klimatischen Verhältnisse bestimmend. Das Rohmaterial, das die Erde den erodierenden Kräften zur Bearbeitung überliefert, hat in den allermeisten Fällen ziemlich einfache Formen. Es kommt dies daher, daß bei allen Arten von Ablagerungen die Schwerkraft ordnend eingreift und Staub, Sand, Schotter, ja auch grobes Blockwerk in regelmäßige Formen bringt. Ebenso bemächtigt sich diese Kraft auch sofort aller vulkanisch aus dem Erdinnern ausgestoßenen Laven und Luffe, die entweder zu breiten Strömen und Tafeln oder aber zu schön geschwungenen Kegeln und Ruppen gegossen werden. Allzeit und allerorts stehen den schroffen, tausendfach zerrissenen und verzweigten Zerströmungsräumen die einfachen, glatten, regelmäßigen Körper gegenüber, die aus den Zerströmungsprodukten gebildet werden.

Diese wichtige Gesetzmäßigkeit tritt uns auch im Gebirge auf Schritt und Tritt entgegen, wenn wir beobachten, wie regelmäßig in allen Tälern die Schuttkegel gestaltet sind, ob sie nun einem einfachen Talleffel oder einer wildzerfressenen Schlucht entspringen, ob sie aus einer Gesteinsart oder aus vielen zusammengesetzt werden.

Die aller einfachsten Formen haben wir aber im allgemeinen auf dem Grunde

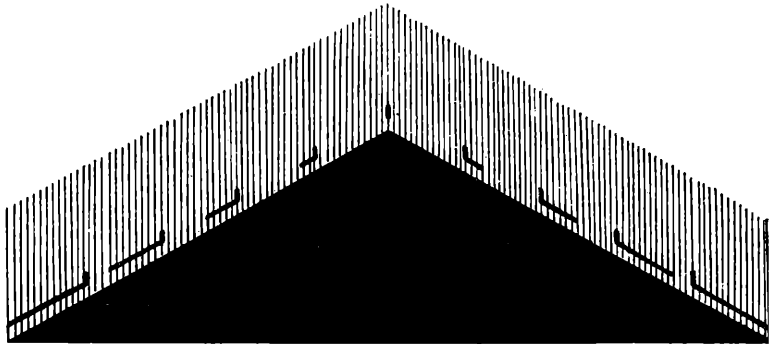


Fig. 1.

der Meere zu suchen, in denen seit sehr langen Zeiträumen die ausgedehntesten und feinstgeordneten Ablagerungen vor sich gehen.

Werden nun durch innere Kräfte der Erde Stücke des Meeresbodens oder einer Ebene emporgehoben, breiten sich mächtige Lavadecken aus, werden Vulkankegel aufgeschüttet oder stufen sich die Landmassen an großen Verwerfungen treppenförmig ab, stets haben wir verhältnismäßig einfache Formen vor uns, an denen nun die erodierenden Kräfte ihre Arbeit beginnen.

Auch für sie ist die Schwere die allgegenwärtige Leiterin.

Von den Scheiteln der Erhebungen fließt das Wasser der Niederschläge womöglich auf den kürzesten Wegen der Tiefe zu.

Bei kegelförmigen oder brotlaibartigen Erhebungen werden radiale, bei langgestreckten Aufwölbungen und Mulden parallel zu der Streichrichtung die Hauptfurchen und senkrecht dazu die Nebenfurchen entstehen.

Die Erhebungen, welche die Erde bildet, besitzen natürlich niemals wirklich ganz glatte Flächen, sondern stets sind in Hülle und Fülle kleine Unebenheiten vorhanden, die die ersten und zartesten Anweisungen für das Fließen des Wassers geben.

Wenn wir uns eine schräg gestellte Fläche vom Regen getroffen denken, so wird zwar die Summe der auffallenden Tropfen auf allen Gleichteilen der ganzen Fläche annähernd dieselbe sein, aber die tieferen Teile werden daneben auch noch das abfließende Wasser der höheren empfangen. (Fig. 1).

Es werden daher die kleinen Abflusrrinnen sich gegen das untere Gehänge hin immer mehr vertiefen, um so mehr als auch in dieser Richtung die Geschwindigkeit des Abflusses und die Menge des mitgeführten Schuttes zunimmt. Aber sie werden sich gegen das untere Gehänge hin auch immer mehr verbreitern, weil sich Neigungswinkel des Gehänges über 45 Grad nicht dauernd erhalten können. Mit dem Breiterwerden der Furchen greifen sich die benachbarten gegenseitig an und die schneller wachsenden fressen die langsameren auf.

Als das Ergebnis dieser mechanisch notwendigen Entwicklung finden wir daher nach längerer Einwirkung der Erosion nahe dem Scheitel einer Erhebung eine ziemlich schwache, feine Gravierung, die sich an den Flanken hinunter immer mehr vertieft und verbreitert.

Wenn also anfangs eine schräge Platte mit ungefähr parallelen Rillen graviert war, so werden diese im Laufe der Zeit gegen unten immer tiefer, breiter und weniger zahlreich. Die großen Furchen ziehen die benachbarten kleineren an sich, erhalten so immer mehr Wasserzuschüsse, so daß sie sich wesentlich rascher vertiefen können als die oberen Verzweigungen.

In ausgezeichnete Weise kann man diese Vorgänge bei starkem Regen auf jeder gutge- wölbten und nicht gepflasterten Straße sich abspielen sehen. Wunderbar sein und in über-

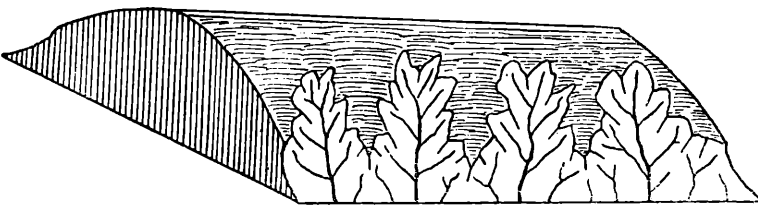


Fig. 2.

raschend reichen Formen zeigen aber im Gebirge häufig Felsen und Blöcke aus reinen Kalken solche Wasser- rillen, die unter dem Namen „Karren“ wohl- bekannt sind.

Der sehr starken Zunahme der Erosionskraft gegen die unteren Abhänge steht gegen oben eine rasche Abnahme nicht nur wegen der schon erwähnten Umstände, sondern auch wegen der stärkeren Schuttbedeckung gegenüber. Ist eine flachschettelige Erhebung von Verwitterungsschutt bedeckt oder mit Vegetation bekleidet, so werden in den oberen Zonen auch sehr starke Niederschläge noch aufgesogen. Diese hier gehemmten Wassermengen wandern dann langsam nach abwärts und treten an den Gehängen als Quellen hervor. An der Austrittsstelle der Quellen und Bäche nimmt daher die Erosionsleistung infolge der Sammlung auf einmal sprunghaft zu und wir sehen daher die meisten Quellen im steileren Gelände von scharfen, vielfach offenen Ver- wundungen umgeben.

Als Ergebnis aller hier angeführten Vorgänge stellt sich somit klar heraus, daß eine Erhebung nicht in den oberen, sondern in den unteren Teilen unter sonst gleichen Be- dingungen am schärfsten von der Erosion betroffen wird. (Fig. 2.)

Wenn wir daher die jeweils nach gleichen Zeitabschnitten entstandenen Bilder der Erosionsentwicklung einer Erhebung, die „Ahnenreihe“ dieser Form, uns vergegenwärtigen, so würden wir vor allem bemerken, daß die Furchen an den Flanken sich immer mehr vertiefen und gleichsam allmählich gegen die Kammhöhe emporwachsen.

Die Wirkung der Erosion schreitet also nicht, wie man vielleicht auf den ersten Blick anzunehmen geneigt ist, von oben nach unten, sondern von unten nach oben vor! Dies hat seinen Grund, weil das rinnende Wasser stets das Gehänge unterschneidet und so zum Nachrutschen bringt. Es ist also eigentlich die Mithilfe der Schwerkraft, die die Anbrüche immer nach oben vergrößert.

Der Satz vom Rückwärtsgreifen gilt nur für die Erosion des fließenden Wassers, nicht aber für jene des Windes oder des Eises.

Wie sich mit dem Vergrößern der Seitenfurchen die Flächen der ursprünglichen Erhebung zwischen ihnen verkleinern und endlich verschwinden, so geht es auch mit den Flächenstücken zwischen den Haupttälern.

Es gibt eine Zeit, wo in einem Relief die letzten alten Flächenstücke aufgeteilt sind und nun zwischen allen Furchen scharfe Kanten verlaufen.

Stellen wir uns in einem Querschnitt die ursprüngliche Aufwölbung und darunter einige nacheinander folgende Stadien der Erosion bis zur Abtragung, also eine volle Ahnenreihe vor, so erkennen wir ohne weiteres, daß die Linie des Reliefs von der anfänglichen Einfachheit an immer kompliziertere Formen annimmt, einen Höhepunkt der Zerschlüßtheit erreicht und dann umgekehrt in immer einfacheren Formen endlich zu einer Ebene ermattet. (Fig. 3.)

Der amerikanische Geograph W. M. Davis, der diese Erscheinung am eingehendsten studiert und ausgezeichnet beschrieben hat, bezeichnet den Zustand der höchsten Zerschlüßtheit des Reliefs als reifes Stadium, dem dann spätreife und endlich greifenhafte folgen.

Wleiben die erodierenden Kräfte in ihrem Wirken ungestört, so werden sie mit immer geringerer Energie solange ihr Spiel treiben, bis das gesamte Relief annähernd zu

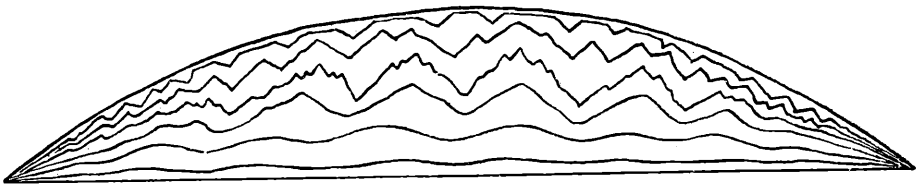


Fig. 3.

einer Ebene erniedrigt ist. Eine solche Ebene, die lediglich durch die Abtragung unter Einwirkung der atmosphärischen Niederschläge erfolgte, wird von den Amerikanern als „Peneplain“, von den Deutschen als „Kumpfebene“, „Festebene“ bezeichnet.

Es ist auch möglich, daß Erhebungen durch die Wirkung lang andauernder, starker Windströmungen zu einer Ebene erniedrigt, also gleichsam weggeblasen werden. Hier hätten wir natürlich in der Entwicklung eine ganz andere Ahnenreihe zu erwarten.

Ebenso wissen wir, daß bei allmählichen Senkungen des Landes seine Erhebungen durch die Wirkung der Meeresbrandung abgeschliffen werden können.

Wir sehen, auf wie vielfache Weise eine Ebene zustande kommen kann, ganz abgesehen von jenen Ebenen, die von horizontal gelagerten Schichten gebildet werden.

Der Zustand der größeren oder geringeren Kompliziertheit wird in dem Relief eines großen Gebirges niemals in allen Teilen gleichzeitig vorhanden sein. Wir werden an den Rändern schon reife Formen finden, wenn sich im Innern noch große unreife Gebiete erhalten, und es werden die Ränder schon spätreife Züge aufweisen, wenn das Innere ein reifes Antlitz erreicht.

Auch die Gebiete mehr oder weniger harter Gesteinsmassen werden zu verschiedenen Zeiten denselben Zustand erlangen, die weicheen viel früher als die härteren. Jene eilen in der Entwicklung gleichsam voraus und altern früh, wogegen die anderen lange ihre Jugendlichkeit bewahren.

Es darf uns daher nicht verwundern, wenn ein großes Gebirge wie die Alpen, das aus vielerlei Materialien aufgebaut ist, manchmal jugendliches und älteres Gepräge in benachbarten Gebieten zur Schau trägt.

Mit der Feinheit der Zerschneidung und Aufteilung der alten Oberflächen schreitet Hand in Hand die Ausgestaltung und Ineinanderfügung der Talwege. Die Talwege sind die Bahnen, auf denen vom Wasser die Massen des losgebrochenen Schuttes abgeliefert werden. Die Auflockerung der Gesteinsmassen durch die Sprengmittel des Gefrierens, Erhitzens, durch die Kraft des Wurzeldruckes, durch Stoß und Schlag würde nur sehr langsam in die tieferen Schichten eindringen können, wenn nicht durch Wasser, Wind und Eis immer wieder das gebrochene Material von den Arbeitsstätten entfernt würde. Erst die Verbindung von Verwitterungskräften mit den entsprechenden Transporteinrichtungen ermöglicht eine rasche Erosionswirkung.

Bäche und Flüsse arbeiten unausgesetzt an dem Ausgleich ihrer Gefällslinien. Die größeren Flüsse erreichen vermöge ihrer Wasserfülle zuerst ein so sanftes Gefälle, daß in dessen Bereiche die Tiefenerosion, das Einsägen in den Untergrund, nicht mehr erfolgen kann.

Dafür finden hier bereits bei wechselndem Wasserstand und durch die steiler zufallenden Seitenbäche Aufschüttungen statt, die den Fluß zum Zerfasern und seitlichen Ausbiegen veranlassen. Insbesondere schieben die Schuttkegel der Seitenbäche bald da, bald dort den Fluß von einer Talsette zur anderen und zwingen ihn, mit seinen Schlingen die seitlichen Berghänge anzugreifen.

Während also im Hintergrund die obersten Talverzweigungen die Reste der alten Oberfläche aufzehren, beginnen die Flüsse schon wieder durch seitliches Pendeln an der Herstellung der neuen Abtragungsebene zu arbeiten.

Verschwinden der alten Oberfläche in der Höhe und Bildung der neuen in der Tiefe können sich manchmal gegenseitig ergänzen.

Würde eine hier betrachtete Erhebung aus ganz gleichartiger Gesteinsmasse bestehen, so wären in dem daraus gebildeten reifen Relief keinerlei plötzliche Sprünge oder Stufen zu entdecken. Es würde nicht nur das ganze Bewegungsnetz der Wasserwege untereinander völlig ausgeglichen sein, sondern auch die Gehänge von der Talsohle bis zu der Bergkante in gleichmäßig geschwungenen Flächen sich erheben. Ein gutes Bild eines solchermaßen geregelten Reliefs bietet uns hier und da im Kleinen die Erosion einer gleichmäßigen Schuttmasse, z. B. von Grundmoränen, Lehmassen, Sandlagen, Tuffen usw.

Das Bild der Grundmoränenlehne bei Boden im Lechtal (Abb. 1, S. 73) kann als ein rasch vergängliches Modell eines reif zerschnittenen Gebirges gelten.

Auch die schon erwähnten Karrenbildungen zeigen bei günstiger Lage eine ähnliche einheitliche Ausbildung und gegenseitige Begrenzung der Erosionsflächen. Doch darf man hier nicht vergessen, daß es sich größtenteils um Abhängen handelt, wodurch auch Hohlräume geschaffen werden können, die ganz außerhalb der erwähnten Gesetzmäßigkeiten liegen.

Stellt die betrachtete Erhebung ein Gebirge aus vielfach verbogenen und zerbrochenen, weichen und harten Schichten vor, so wird die Erosion diese vorgezeichneten Strukturen allenthalben berücksichtigen und herausarbeiten. Auf diese Weise werden eine Menge von Wandstufen und Gefällsbrüchen sowohl im Gehänge als auch in den Wasserwegen abgebildet erscheinen.

Wenn man sich daher die Frage stellt, sind die Formen der Alpen durch eine einheitliche Erhebung und eine Erosionsphase zu erklären, so muß man bei den vorhandenen Unregelmäßigkeiten in erster Linie die geologische Struktur befragen, ob sie in dieser begründet sein können.

Auf den ersten Blick scheint man hier vor einer großen Schwierigkeit zu stehen, doch hilft uns die mannigfaltige Struktur der Alpen darüber weg, indem wir mehrfach Gebiete von leicht zu überschauenden geologischen Verhältnissen für solche Studien tiefen.

Hier kommen zunächst Gebiete aus gleichartigen Gesteinen in Betracht, dann solche, die einen einfachen Bau mit gleicher Schichtenfolge auf größere Strecken bewahren.

Für die Beurteilung der Erosionsarbeit sind Gebirgsgruppen aus gleichartigem Material am allergeeignetsten. Im Bereiche der Ostalpen kommen dafür z. B. die Tonallitmasse des Adamello, die kleine Granitmasse der Cima d'Alta und die größere von Brigen, sowie die Zillertaler Gruppe und die Tauern in Betracht, soweit diese aus dem einförmigen Zentralgneiß bestehen.

Bei deutlich gegliederten und in einzelnen Lagen sehr verschieden widerstandsfähigen Schichtmassen ist die Lagerung von größter Wichtigkeit.

In einem Gebiete von regelmässiger, weit hinreichender Faltung werden die Mulden die Haupttäler, die Sättel die Hauptkämme bilden. Ungefähr senkrecht dazu werden sich die Seitentäler einfügen. In solchen Gebieten ist auch bei dem Tiefergreifen der Erosion von einer Schichtgruppe zur nächsten keine wesentliche Verschiebung zu erwarten.

Gebiete mit senkrecht aufgestellten Schichten können im Streichen der Gesteine sehr große Unterschiede aufweisen, dagegen erscheinen diese bei der senkrecht dazu durchbrechenden Erosion ausgeschlossen. Wenn es sich aber um sehr ähnlich feste Gesteine handelt, wie dies bei den kristallinen Schiefen oft auf weite Erstreckungen der Fall ist, so kommt die Streichrichtung nicht als besonderes Leitmotiv in Betracht.

Horizontal gelagerte Schichten bilden bei der Hebung gewöhnlich Plateausflächen, auf denen sich nur schwer ein regelmässiges Entwässerungssystem entwickelt. Meist werden sie von den Rändern her abgebröckelt und den benachbarten Tälern angegliedert.

Bestehen die Hangendschichten solcher Platten aus leicht löslichen Kalken, so geht die Entwicklung der Wasserwege nicht in der Form von Furchen- und Talbildung, sondern in der Anlage von unterirdischen Kanalisationen vor sich. Je mehr sich die angrenzenden Täler einschneiden, desto tiefer sinken diese Kanäle in das Innere der Kalkmassen hinein.

In vielen Fällen haben jedoch die Kalkplateaus in den heute abgetragenen jüngeren Schichten wasserundurchlässige Rappen besessen, auf denen sich insbesondere in Anlehnung an benachbarte größere Erhebungen sehr wohl zusammenhängende Wasserwege entwickeln konnten. War aber einmal die Decke von der Erosion verzehrt, so zogen sich die Wasserläufe allmählich immer tiefer in ihr Kalkgehäuse hinab. Ein großartiges Beispiel für diesen Vorgang bietet die Dachsteingruppe. Hier haben uns die Höhlenforschungen ausgedehnte, unterirdische Räume und Kanäle kennen gelehrt und zugänglich gemacht, in denen stellenweise noch in Menge Schotter und Kiesel jener alten Gewässer aufbewahrt liegen, die einst über die Oberfläche dieses Kalkplateaus ihren Weg genommen haben.

Ein Kalkplateau, das einmal von tieferen Tälern umschnitten ist, hält sich wie eine Festung gegenüber den Angriffen der Erosion. Die steilen Ränder wittern, wenn sie auf festen Schichten ruhen, nur sehr langsam zurück; auf der Hochfläche aber bildet sich ein fast unentwirrbares Gefolge von Buckeln, Trichtern, Karren und Sadgassen aus, in denen alle zufallenden Niederschläge aufgenommen und größtenteils ins Innere abgeleitet werden.

Es ist für die Haltbarkeit dieser Plateaus bezeichnend, daß auf einer großen Zahl von ihnen die sogenannten „Augensteine“, das sind kleine, wohlgerollte Kiesel, als Zeichen uralter Flußläufe noch heute zu finden sind. Noch mehr davon dürfte in den ungezählten Schlünden und Höhlen dieser Kalkstöcke für immer verborgen bleiben.

Die weitere Entwicklung der Verteilung einer hochliegenden Platte von horizontalen Schichten hängt dann vor allem von der Beschaffenheit ihrer Unterlage ab. Stellen sich hier z. B. unter festen Kalk- und Dolomittlagen weichere, vielleicht wasserundurchlässige Mergel, Schiefer, Sandsteine, Tuffe usw. ein, so treten an allen Rändern entlang dieser Grenzzone Quellen und Bäche aus, die ständig das weichere Material wegspülen und so die Sohle der schwebenden Kalkdecke untergraben. Auf diese Weise



brechen dann die benachbarten Talfurchen verhältnismäßig rasch in das Kalkplateau hinein.

Dieses Einbrechen der Täler erfolgt wesentlich schneller als die Erniedrigung der zwischen ihnen stehenden bleibenden Blöcke. So kommt es, daß eine reife Durchgliederung einer großen Horizontaltafel völlig fremdartig gegenüber einem anderen Schichtgebirge desselben Stadiums aussteht.

Wir finden eine Durchlichtung mit breiten Talzügen, zwischen denen sich die einzelnen Felsriffe wie Statuen auf erhöhten Sockeln erheben. Die Dolomitgebiete Südtirols sind in den Alpen das großartigste Beispiel dieser Reife, aber auch z. B. die Dolomiten der Brennerbucht zeigen in kleineren Verhältnissen dieselben feinen, senkrechten Auschnearbeiten.

Wenn wir nach diesen Überlegungen die Formen der Alpen mit der Fragestellung untersuchen, ob diese Formen Ergebnisse einer einmaligen Erhebung und einer einheitlichen Erosionsphase sein können, so müssen wir dies nach unseren heutigen Erfahrungen verneinen.

Es lassen sich allerdings fast überall einzelne Berge, Hänge und auch Täler finden, die ganz den Eindruck erwecken, als ob sie völlig einheitlich nach einem Plane zuge-

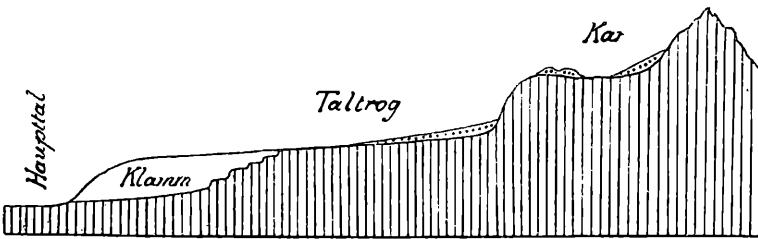


Fig. 4.

schritten wären, aber wir bemerken bald, daß dies nur Ausnahmen sind, die einer besonderen Erklärung bedürfen.

Im allgemeinen können wir sagen, daß die Hochgebirgsfor-

men der Alpen wenigstens drei regelmäßig übereinander angeordnete Zonen von bedeutenden Gefällsbrüchen aufweisen, die sich gerade in Gebieten mit gleichartigem Gesteinsmaterial besonders deutlich hervorheben.

Steigen wir von einem Haupttal durch ein Seitental gegen den Gebirgskamm empor, so treten uns diese Formenreihen ebenso deutlich wie die Vegetationsgrenzen entgegen. Es sind dies die Steilstufenzone an der Mündung der kleineren gegen die größeren Täler, der Steilstufengürtel am Talschluß und endlich die Flucht der Gipfel- und Rammwände über den Kären und Gletschern. (Fig. 4.)

Diese Abstufungen sind nicht nur in der Längsrichtung der meisten Seitentäler zu finden, sondern auch quer dazu, nur sind sie hier auf engem Raume übereinander gedrängt und schließen häufig unmittelbar zusammen. Am Fuß der Mündungsstufe liegt die Sohle des breiteren Tales, am Fuß des Talschlusses der meist flache, zugeschüttete Talboden des Seitentales und am Fuß der Gipfelwände der flache, oft sogar rückfällige Boden des Kares.

Mündungsstufen und Kare sind schon lange als Abweichungen von der Normalgestaltung erkannt worden. Wesentlich später hat dann E. Richter die Aufmerksamkeit auf den sogenannten „Taltrog“ gelenkt, dessen seitliche Begrenzung als Trogwände, dessen innere als Trogschluß bezeichnet wird.

Ein großer Teil der Schönheiten unserer Alpen ist an diese Steilstufen geknüpft. Sprühende Wasserfälle und wildrauschende Klammern halten am Eingang in die Hochtäler festerliche Wacht. Über die Trogwände und Trogschlüsse seilen sich silberne Wasserfäden herunter oder perlen schimmernde Eisbrücke hernieder. Die helle Weitung

durch die Eis- und Firnflächen aber schafft erst jene wundervolle Abgeschlossenheit und himmlische Thronstille der hohen Bergwelt.

Die diesem Aufsatz beigelegten Kartenhinweise auf Adamello- und Anfoegelgruppe sowie Lechtaler-, Allgäuer Alpen zeigen uns, daß gerade in Gebieten von einfachem geologischen Bau, wo die Struktur keinen verzerrenden Einfluß auf die Ausgestaltung des Reliefs nimmt, die Ausbildung von Karren, Trogtälern und Faltstufen außerordentlich klar zu erkennen ist.

Wenn sich nun aber die tatsächlich in den Alpen vorhandenen Formenreihen nicht durch eine einheitliche Erosionsphase erklären lassen, so müssen wir versuchen, ob sich ein Ausweg durch Annahme von mehreren, verschiedenen Erosionsphasen gewinnen läßt.

Die Unterbrechung einer Erosionsphase vor ihrem natürlichen Ende, der Schaffung einer Kumpfebene, kann entweder durch klimatische Veränderungen oder durch Verschiebungen in der vertikalen Höhenlage erzwungen werden. Verstärkung der Niederschläge würde das Relief im gleichen Sinne nur in rascherer Gangart weiterbilden. Verminderung aber würde zu einem Überhandnehmen des Schuttwerkes führen, das schließlich alle Erhebungen unter sich verhüllen würde. Auf diese Weise sind also die typischen Abweichungen der Alpen vom Normalrelief nicht zu erklären.

Zu wesentlich günstigeren Ergebnissen gelangen wir aber, wenn wir die normale Erosionsphase durch eine oder mehrere glaziale Erosionsphasen unterbrochen denken. Dieser Erklärungsweg ist insbesondere in dem wichtigen Werk „Die Alpen im Eiszeitalter“ von A. Penck und E. Brückner vollständig durchschritten worden und dürfte sich heute wohl der größten Anhängerschaft erfreuen.

Nach der in diesem Werke vertretenen Auffassung sollen die Alpen vor Eintritt in das Eiszeitalter bereits spätreife Formen, also Mittelgebirgsformen, besessen haben.

In diese Mittelgebirgslandschaft sollen dann die Gletscher nicht nur die Rare eingesenkt, sondern auch durch eine scharfe Erosion die Täler um mehrere hundert Meter tiefer gegraben haben. Nach dieser Ableitung würden die Alpen ihren Hochgebirgscharakter ausschließlich der Wirkung der Vergletscherungen verdanken. Penck und Brückner sind zu dem Ergebnis gelangt, daß die Alpen von einer viermaligen Vergletscherung heimgesucht wurden. Rare, Trogtäler und Faltstufen sollen nun ein gemeinsames Werk aller dieser Eiszeiten vorstellen.

Die Annahme, daß die Erosionsarbeit von vier verschiedenen, durch lange Interglazialzeiten getrennten Vergletscherungen nur eine Trogform ergeben habe, war so unwahrscheinlich, daß H. Heß gewissermaßen nur im konsequenten Ausbau der Lehre der Eiserosion und der vierfachen Vergletscherung auch vier ineinander gesenkte Faltröge in den Alpen nachzuweisen suchte. (Fig. 5.)

Noch weiter ging in dieser Richtung dann R. Lucerna, der zu der Meinung gelangte, daß der ganze Formenschatz des Hochgebirges erst in den Rückzugsstadien der letzten Eiszeit geschaffen worden sei.

Gegenüber den Anhängern einer so gesteigerten Erosionsleistung der Gletscher standen und stehen andere Gruppen von Forschern, die dem Einfluß der Eiszeiten auf die Formenwelt der Alpen ein ganz geringes, oder doch viel kleineres Ausmaß zugestehen.

Die Frage, mit der wir uns also beim weiteren Fortschritt unserer Untersuchung zu beschäftigen haben, ist der Unterschied zwischen der Erosionsarbeit des Wassers und des Eises.

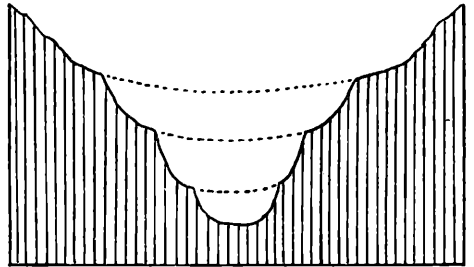


Fig. 5.

Der Unterschied beginnt schon bei den Niederschlägen selbst. Still und gart schweben die Schneeflocken in Wirbeln hernieder und bilden auf dem Boden eine weiche Schutzdecke, während die Regentropfen mit großer Geschwindigkeit die Luft durchheilen und mit ziemlicher Schlagkraft auf die Erde treffen. Als Seltenheiten fallen dann noch Eiskörner aus den Wolken, die bei einiger Größe schon eine starke Schlagkraft entwickeln und das Gelände anzugreifen vermögen. Insbesondere die schon vom Regen erweichten Schuttlehnen vermag das Feuer des Hagels scharf zu verwunden und zum Rutschen zu bringen.

Während aber der Regen, da das Wasser schon bei der geringsten Neigung abfließt, meist unmittelbar auf den Grund schlägt, webt sowohl der Schnee als auch der reichliche Hagel gleich eine Schutzschicht über den Boden.

Stellen wir uns zwei große, schräge Schichtplatten von gleicher Beschaffenheit vor, von denen die eine lange Zeit hindurch der Erosion des Wassers, die andere dieselbe Zeit der Erosion von Firn und Eis unterworfen sei. Durch die Erosion des Wassers wird im Laufe der Zeit auf der ganzen Fläche erst eine feine Skulptur, dann eine tiefere Rillung und endlich Furchung und Talbildung ausgeführt werden, wobei im wesentlichen fort und fort das Bestreben herrscht, in der Richtung des Gefälles aus der anfänglich großen Zahl eng benachbarter Rillen immer weniger und größere zusammenzufassen.

Wir haben uns bereits früher klar gemacht, daß bei der Erosion durch Wasser gegen die unteren Hänge zu eine außerordentliche Steigerung der Wassermenge und auch der Geschwindigkeit in den Abflusrrinnen stattfindet.

Diese fein individualisierte Arbeitsleistung fehlt bei einer langsam gegen die Tiefe gleitenden Eisdecke zum größten Teil.

Ist das Material des Untergrundes von gleicher Beschaffenheit, so wird sich nur entsprechend der gegen unten zunehmenden Geschwindigkeit eine etwas lebhaftere Abschleifung der unteren Hänge einstellen.

Die Möglichkeit zur Ausbildung eines feingliederten Reliefs senkrecht zur Fließrichtung ist bei gleicher Belastung mit Schnee und Eis nicht gegeben.

Wir können also behaupten, es ist nicht möglich, daß durch rein glaziale Erosion aus ursprünglich einfachen Formen hochkomplizierte geschaffen werden. Eine Feinzertellung des Reliefs, wie wir sie z. B. bei dem Granitfels des Adamello oder der Aufwölbung des Hornbacherkammes gewahren, kann man nicht als das Werk von Vergletscherungen erklären.

Durch die Erosion von Eisdecken ist es nicht möglich, aus einer brotlaib- oder wadenähnlichen Grundform solche feingliedrige Architekturen zu erzeugen. Das Eis ist ein viel zu breites und stumpfes Werkzeug für so feine Arbeiten. Es strebt stets danach, ein Relief zu verbreitern, abzurunden, abzustumpfen, kurz zu vereinfachen.

Wir haben uns nun weiter zu fragen, welche Formänderungen wird die Vergletscherung in einem bereits relief oder spätreif modellierten Gebirge hervorbringen können?

Erfüllt sich ein reifes Talssystem allmählich mit Eismassen, so ist damit entschieden eine ganz veränderte Beanspruchung des Talgrundes und der Seitenhänge verbunden. Die Wirkung wird einmal in erster Linie von der Mächtigkeit des Eisstromes abhängen. Während die Mächtigkeitsschwankungen eines Baches im Verhältnis zum Talraum überhaupt keine Rolle spielen, haben die Eismassen tatsächlich die Talräume zu großem Teil auszufüllen vermocht. Es fragt sich nun, in welchem Zeitverhältnis jeweils das Anwachsen und Schwinden einer Vergletscherung zu der Dauer ihres Hochstandes steht. Mit anderen Worten, es kommt vielfach für die Beurteilung der Erosionsleistung darauf an, ob die größte Eisfüllung des Tales oder nur eine teilweise und schwankende das Entscheidende ist. Verschwinden die Zetten des Anwachsens und Schwindens gegenüber der Länge des Hochstandes, so haben wir vor allem nur die



G. Geyer phot.

Abb. 5. Südwestansicht vom Hochstadel (Lienzer Dolomiten)



G. Geyer phot.

Abb. 6. Ansicht von der Kleinen Sandspitze (Lienzer Dolomiten)



Verlag von Fritz Gratl, Innsbruck

Abb. 7. Nordwand der Eiskarl- und Sprizkar Spitze



G. Geher phot.

Abb. 8. Eisenschuß vom Hallebachförl (Lienz Dolomiten)

Wirkung dieses letzteren Zustandes im Gelände zu erwarten. Die Mittel, mit denen ein Gletscher seinen Untergrund anzugreifen vermag, sind Schub unter bedeutendem Druck, der durch mitgeschleppte Steine, Sand und Schlamm besonders wirksam wird. Außerdem kommt aber bei Druckschwankungen die Möglichkeit des Gefrierens und Auftauens auch auf dem Boden dieser Eisströme noch in Betracht. Durch diese Vorgänge wird einerseits die Ablösung von feinem Gesteinspulver, andererseits gelegentlich auch die Lossprennung größerer Erklümmen eingeleitet.

Diese Wirkungen sind an der ganzen Sohle des in Bewegung befindlichen Gletschers zu erwarten, jedoch in recht verschiedener Stärke.

Wenn wir den V-förmigen Querschnitt eines normalen Tales als Ausgangsform betrachten, so hätten wir nach der ersten Vermutung über der Mitte des Tales den größten Eisdruck zu gewärtigen.

Dies ist aber nicht der Fall, da einerseits hier in vielen Fällen die Schmelzwasser Hohlräume offen halten und andererseits, wenigstens bei engen Hochtälern, durch Gewölbspannungen ein großer Teil des Druckes auf die seitlichen Widerlager, die Talhänge, übertragen wird. (Fig. 6.)

Es ist also theoretisch wahrscheinlich, daß die Hauptbeanspruchungen nicht in der Mitte des Tales, sondern an den unteren Teilen der Seitengehänge zu suchen sind. Dementsprechend werden auch hier die lebhaftesten Abschleifungen des Grundgebirges stattfinden. (Fig. 7.)

Bei entsprechenden Talweiten und Eishöhen ist es sogar möglich, daß mit der Zeit der mittlere Talboden als ein relativ geschonter Teil einen erhabenen Rücken bildet, der beiderseits von tiefer eingesenkten Furchen begleitet wird. (Fig. 8.)

Gegen oben muß mit dem Druck der Betrag der Gehängeabnutzung geringer werden, wenn nicht örtlich vielleicht manchmal das Ausstreichen einer besonders steinreichen Gletscherfaser eine schärfere Ausschleifung bedingt.

Es geht aus diesen Überlegungen wohl hervor, daß wir den Gletschern bei langer Einwirkung und entsprechend hohem Stande eine U-förmige Ausweitung anfänglich V-förmiger Täler zuschreiben können. Dasselbe gilt für die Ausweitung einer V-förmigen Talverzweigung zu einem U-förmigen Karraum.

Bei dem Studium der Taltröge hat nun aber U. Pænd die Beobachtung gemacht,

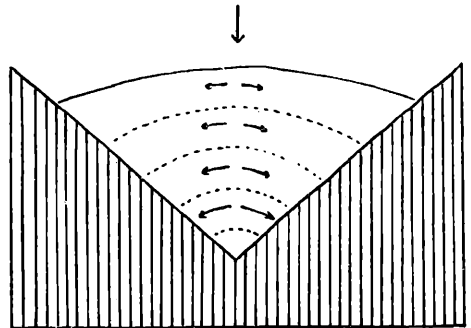


Fig. 6.

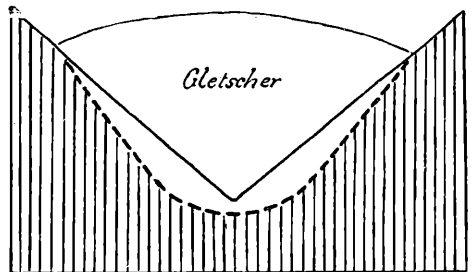


Fig. 7.

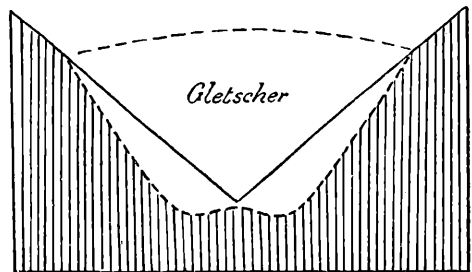


Fig. 8.

daß der Taltrug nicht einfach in das alte V-förmige Tal hineingesenkt ist, sondern sich vielmehr an den oberen Trogrand häufig eine auffallende Verbreiterung des Gehänges anschließt. Er hat diese Fläche als „Schliffbord“ und das ganze Gefimse als „Schliffkehle“ bezeichnet. (Fig. 9.)

Es ist sehr unwahrscheinlich, daß diese Verbreiterung am oberen Rand des Taltruges mit der Eiseroftion zusammenhängt.

Nach meiner Meinung tritt uns hier im Gegentell jene sprunghaft gesteigerte Erosionsarbeit entgegen, die überall am Rande von lang stabil bleibenden Eis- oder Firnflächen gegen aperiés Gelände zu beobachten ist. Die dunklen Felsen, die sich z. B. als

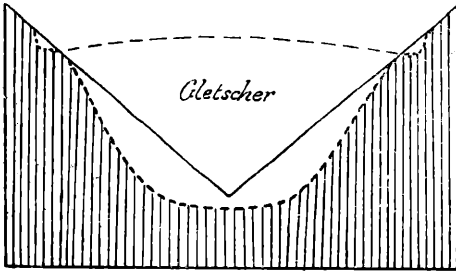


Fig. 9.

Rippen aus einem Firnhang erheben oder einen Eisstrom begleiten, haben bei klarem Himmel unter einer gewaltigen Bestrahlung von den weißen Feldern zu leiden, die in der Nacht mit einer ebenso schroffen Abkühlung wechselt. Hier rieseln auch am meisten Schmelzwasser nieder, die für diese Felszone ein häufig benütztes Sprengmittel bilden. Sehr schön tritt diese Wirkung an vielen der hohen, vereisten Gipfel der Alpen hervor.

Hier trifft man alle Runsen mit Eis beschlagen, das an den Bergkörper angefroren

ist. Dieser Eisbeschlag bildet die beste Schutzwehr gegen eine weitere Vertiefung der damit gepanzerten Rinnen durch Stein Schlag oder Lawinen. Die zwischen diesen Runsen aufragenden, oft aperiés Ranten und Grate werden aber durch die gerade geschildderten Vorgänge in lebhafter Weise abgeprengt.

Wir bemerken unter allen aperiés Fels teilen des Hochgebirges die schwarzen Streifen der abgeprengten Gesteinstrümmer.

Durch die fortgesetzte Absprennung der zwischen Eis- und Schneefeldern aufragenden aperiés Felsrippen werden allmählich jene schönen glatten Firnhänge erzeugt, die vielfach die kühnen, höchst aufragenden Drei- und Vierkanter unserer Alpen schmücken.



Fig. 10.

Dieselbe Wirkung muß aber auch dazu führen, die trennenden Felskämme zwischen benachbarten Gletscherklaren wegzusprennen und aus mehreren Abteilungen ein großes Riesentkar zu bilden. (Fig. 10.)

Die lebhaften Sprengwirkungen an den „Schwarzweißgrenzen“ des Hochgebirges werden durch die stetige Wegführung des gebrochenen Schuttwerkes durch das fließende Eis noch wesentlich gefördert.

So kann es geradezu als Regel gelten, daß der meiste von den heutigen Gletschern mitgeschleppte Schutt von solchen Schwarzweißgrenzen stammt, die als die Nährer der großen Moränenzüge anzusehen sind.

Wir haben nach den bisherigen Ausführungen erkannt, daß die Verwandlung eines V-förmigen in einen U-förmigen Talquerschnitt als typische Arbeitsleistung eines diesen Querschnitt genügend lang durchfließenden Eisstromes aufzufassen ist.

Wir haben nun weiter zu forschen, ob sich auch im Längsschnitt eines Tales ähnliche Umformungen einstellen werden.

Bei der großen Rolle, die für die Druckverteilung in einem Eisstrom die Seiten-

hänge eines engen Tales spielen, denn ohne diese Widerlager würde der Eisstrom wie ein Honigfladen auseinanderfließen, werden sich Verengungen und Verbreiterungen des Taltroges auch in der Erosion des Längsschnittes widerspiegeln.

Bei Verengungen wird ein größerer Teil des Druckes auf die Seitenwände übertragen, bei Verbreiterungen ein entsprechend kleinerer. Bei Verschmälerungen wird daher die Talsohle weniger, das Seitengehänge um so stärker abgeschliffen (bei Verbreiterungen aber umgekehrt, die Talsohle stärker und das Gehänge weniger). Auf diese Weise muß allmählich das ausgeglichene Längsprofil des Tallaufes zerstört werden, indem an den Erweiterungen Mulden ausgefegt werden, wogegen die Verengungen als Talstufen sich erhalten. Es ist jedoch nicht wahrscheinlich, daß sich auf diese Weise steile und hohe Stufen im Talprofil erklären lassen.

Die Lage von solchen geschonten Stufen und ausgehörfteten Mulden verschiebt sich nicht wesentlich talauf oder talab, da ja die Talverengungen, die sie hervorrufen, ihre Stellung sehr lange behaupten.

Während also die Erklärung der Talaustrundung sowie der Stufen- und Muldenbildung mit Hilfe der Eiserosion gut gelingt, versagt sie für die Entstehung einer großen Taluntertiefung, für die Anlage der Trogwände und Trogschlüffe.

In sehr vielen Fällen setzt der Talrog mit einer mächtigen Wandstufe im Hintergrund des Tales plötzlich ein. Der Trogschluß pflegt dann gewöhnlich gleichsam im Brennpunkt mehrerer hier zusammenstrahlender Rare zu liegen.

Nimmt man an, daß hier vor Eintritt der Eiszeit nur eine einfache Talverzweigung vorlag, so ist man gezwungen, der Eiserosion gerade an der Stelle des Zusammenströmens mehrerer Gletscher einen besonders hohen Wert zuzuschreiben. Dies ist mechanisch wohl recht unwahrscheinlich, da gerade an der Stelle des Aufeinandertreffens mehrerer gegeneinander strömender Eismassen ein sehr großer Teil der vorhandenen Bewegungsenergie auf die Einlenkung und Anpassung der neuen Stromrichtung verwendet wird.

Zugleich ist im allgemeinen eine ziemliche Querschnitts-Verengung vorhanden, so daß man eher eine Schonung als eine so scharfe Untergrabung hier erwarten möchte. Nur die Beschleunigung, die beim Eintritt in den engeren Querschnitt erzwungen wird, könnte für die Erklärung der gesteigerten Erosion herangezogen werden.

Hierzu ist aber zu bemerken, daß sich die Zunahme der Geschwindigkeit nicht so sehr in den unteren und seitlichen Lagen des Eisstromes, als vielmehr in den mittleren ergehen wird, die für die Erosion nicht in Betracht kommen.

Es ist aber auch nicht möglich, den Trogschluß der Hochtäler etwa als eine vom Eise ganz in den Hintergrund verschobene frühere Talstufe zu erklären.

Während ein Wasserfall im Laufe der Zeit unaufhaltfam talaufwärts verschoben wird, da die Erosion an seiner Aufsprungstelle vielmals größer wie an der Abprungstelle ist, vermag ein Eisstrom im allgemeinen eine Felsstufe nicht talaufwärts zu verschieben, da bei ihm die Erosion gerade umgekehrt an der Stirne der Stufe größer als an ihrem Fuße ist.

Die Wirkung der Eiserosion auf eine Felsstufe, die quer zur Fließrichtung verläuft, besteht in einem allmählichen Niederschleifen der Stufe. Diese Stufe wird an Ort und Stelle langsam erniedrigt, bis sie verschwindet.

Es liegt dieser große Unterschied in der Arbeitsweise eines Wasserfalls und eines Eissturzes wieder in der so verschiedenen Beweglichkeit der beiden Medien begründet. Der Wasserfall stürzt frei mit furchtbarer Gewalt auf die Sohle des Tales, die er verhältnismäßig rasch zu vertiefen vermag, da er auch häufig Schlamm und Steine mit sich reißt. Außerdem arbeitet der mächtige Strahl vielfach mit drehenden Bewegungen als ein riesiger Bohrer. Durch den Rückprall des Wassers wird zudem stetig der Fuß der Wandstufe unterhöhlt, bis die Felsen den Halt verlieren und



niederbrechen. (Fig. 11.) Das Wasser geht bei seiner Arbeit ähnlich wie der Mensch vor, indem es oft durch verhältnismäßig kleine Untergrabungen oder Herausspülung weicherer Lagen Felsmassen zum Absturz bringt, zu deren normaler Eroberung ungeheure Zeiten nötig gewesen wären.

Alle diese Möglichkeiten, wie sehr scharfe Steigerung der Geschwindigkeit, dann rasch drehende Bewegungen, Unterspülungen usw., stehen dem Eise bei seiner Arbeit nicht zur Verfügung. Das Eis ist ein plumper Motor, der immer beinahe die ganze riesige Fläche seines Bettes gleichzeitig und auch gleichartig bearbeiten muß.

Bei der Überwindung einer Felsstufe wird sich zudem im geschützten Winkel unter der Wand ein Keil von totem Eis und von totem Moränenmaterial sammeln, die den Fuß der Wand so lange schützen, bis sie von oben her niedergeschliffen ist. (Fig. 12.)

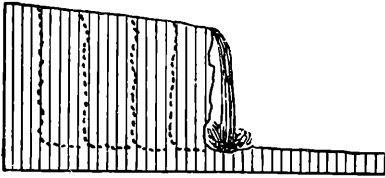


Fig. 11.

Wir ersehen aus allen diesen Überlegungen, daß man weder eine bestimmt umschriebene Erosionsarbeit des Eises bezweifeln, noch aber auch ihm die Lösung von Aufgaben zutrauen darf, die mit seinen Mitteln nicht zu bewältigen sind.

Es ist also nicht wahrscheinlich, daß man die Bildung der Frossklüfte und eine Ubertiefung der Täler um Hunderte von Metern als Ergebnis der Eiserosion beanspruchen kann. Ebensovienig kann der Eiserosion die ursprüngliche Anlage und Abteilung der Rarräume zugemutet werden.

Bei der Abschätzung der Arbeitsleistung von Eis- und Wassererosion darf man nicht vergessen, eine wieviel schwerfälligere und plumpere Maschine mit riesigen inneren Reibungsverlusten der Gletscher gegenüber Bächen und Flüssen ist.

Betrachten wir eines der Alpenhochtäler, so sehen wir die Bäche und Quellen überall rastlos bei der Arbeit, das Gehänge zu untergraben. Dadurch arbeitet das Wasser gleichsam mit mächtigen Hebeln. Kleine und große Blöcke werden ebenso wie ganze Felsvorsprünge unterminiert und brechen endlich in wilden Stürzen nieder, wobei sie längs ihrer Bahn häufig noch größere Massen zum Losbruch zwingen.

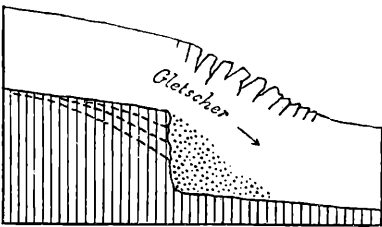


Fig. 12.

Man könnte die Wassererosion mit der Zündkapsel vergleichen, deren Explosion erst die eigentliche Geschloßladung, hier die Schwere, zur Auslösung bringt.

Füllt sich ein Tal mit Eis, so kommt für das vom Eise bedeckte Gelände die wichtige Mitwirkung der Schwere kaum mehr in Betracht. Es wird im Gegenteil ja ein Druck gegen das Gehänge ausgeübt und dadurch die sonst vorhandene große Zugspannung der Steilhänge sehr gemildert.

Um einen Talboden zu vertiefen, muß der Gletscher Millimeter für Millimeter der ganzen Breite und Länge wirklich niederschleifen und zudem noch das Seitengehänge ständig mit verbreitern.

Während die Bäche stets schroffe, zackige, kantige Anrisse erzeugen, an deren Rauigkeiten leicht wieder weitergearbeitet werden kann, schaffen sich die Gletscher durch das Ausfeilen ihrer Abfluskanäle verhältnismäßig bald so glatte Rinnen, daß eine weitere Erosion nur schwer mehr Angriffspunkte findet. So erschweren sich die Eisströme durch das Schleifen und Polieren ihrer Bahnfläche stetig selbst die Möglichkeit weiteren Angriffes.

Wir haben längst gelernt, uns gegen die weitere Erosion von Wildbächen dadurch zu sichern, daß wir ihnen künstlich geglättete Laufrinnen zur Verfügung stellen.

Ein wichtiger Unterschied zwischen Eis- und Wassererosion liegt dann darin begründet, daß die Gletscher ihre Erosionsanbrüche von oben gegen unten vortreiben, während jene des Wassers sich von unten gegen oben vergrößern.

In den eben vom Eise verlassenen Gebieten läßt sich darum mit großer Deutlichkeit an allen Erhebungen die stark abgenutzte innere Stoßseite von der geschonten äußeren Schattenseite unterscheiden und man hat dieses Merkmal vielfach zur Feststellung der Bewegungsrichtung verwenden können.

Der typische Vorteil der Eisarbeit besteht in der Verwendung von oft sehr hohem schiebendem Druck, wodurch unter günstigen Umständen selbst ausgedehnte Schichtmassen verschoben und gefaltet werden können. Auch vermögen die Eisströme auf ihrem Rücken vielfach größere Blöcke weit hin zu verschleppen, als dies dem Wassertransport je möglich ist. Ebenso gehört die Ausschleifung von Mulden, Becken, Kanälen, Einkerbungen zur normalen Arbeit der Eiserosion, die nicht bloß beim Wechsel der Talweite, sondern auch bei dem der Gesteinsfestigkeit, der Schuttführung oder der Druckverteilung eintreten kann.

Überblicken wir die hier vorgelegten Erwägungen, so erscheint es nicht wahrscheinlich, daß man die Umformung der Alpen aus einem Mittelgebirge in ein Hochgebirge ganz auf die Rechnung einer mehrfachen Vergletscherung setzen kann. Es liegt diesem Versuche doch eine zu hohe Bewertung der Eiserosion sowie eine Verkennung ihrer Arbeitsmethoden zugrunde.

Wenn sich aber die Abweichungen des Alpenreliefs von den Normalformen auch nicht durch die Mitwirkung der Gletscher restlos erklären lassen, so bleibt nur noch übrig zu untersuchen, ob wir vielleicht mit der Annahme mehrerer Hebungen des ganzen Gebirgskörpers ein Auslangen finden können.

Die Erhebung des Alpengebirges über das Meeresniveau wurde in früherer Zeit ausschließlich mit den heftigen Faltungen der Gesteinschichten oder den eingeschalteten vulkanischen Massengesteinen in Zusammenhang gebracht. Ein solcher Zusammenhang zwischen Faltung der Schichten und Erhebung ist auch sicher vorhanden, wenn auch nicht in der Form, daß die Hochstellung des Gebirgskörpers nur von der mehr oder weniger heftigen Zusammenpressung seiner Schichten abhängig ist. Wir bemerken auf der Erde neben hochaufragenden Faltengebirgen auch ungefaltete Schichtsysteme in sehr hoher Lage und sehen außerdem, daß auch innerhalb der Alpen wenig gefaltete Teile dieselben Höhen wie stark gefaltete erreichen.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß für die vertikale Einstellung eines Gebirges Bewegungen im Erdinnern entscheidend sind, die nicht notwendig mit Faltungen verbunden sind.

Es ist daher zwischen der Auffaltung eines Gebirges und seiner verschiebbaren Höhenstellung wohl zu unterscheiden.

Die genaue Kenntnis, die wir heute in den Alpen über die gesamte Schichtfolge einzelner Gebiete besitzen, gibt uns die Mittel zur Abmessung jener Beträge, um die z. B. die Bergspitzen einer Zone seit der Auffaltung erniedrigt worden sind. Wir kommen hier z. B. für die Nördlichen Kalkalpen zu Beträgen von 2000—3000 m.

Machen wir nun die Annahme, die Erhebung der Alpen wäre von Anfang an durchschnittlich um 3 km höher gewesen, so hätten wir bei der heute vorliegenden tiefen Zertalung wesentlich breitere Talssysteme und weiter auseinandergerückte Rammlinien zu erwarten. Ein Gebirge kann nicht dasselbe Relief zeigen, ob es aus einer 3—4 km oder doppelt so dicken Schichtenplatte herausgeschnitten ist.

Es liegt im Wesen der Wassererosion, daß eine Vertiefung der Furchen auch mit deren Verbreiterung verbunden ist. Ist aber das heutige Relief zu fein gegliedert, als daß es aus einer doppelt so hohen Erhebung herausgeschnitten sein könnte, so werden wir auch auf diesem Wege zu der Anschauung von mehrmaligen Erhebungen des Gebirgskleibes gedrängt.

Wenn die Alpen aber nicht mit einem, sondern mit mehreren Rucken gehoben wurden, so haben wir zu untersuchen, welches die Wirkungen mehrfacher Hebungen auf die Ausgestaltung des Reliefs sind, und ob sich diese mit der Formenreihe der Alpen vereinen lassen.

Die erste Hebung wird, wie wir schon wissen, für sich ein Relief ins Leben rufen, dessen Formen von der Höhe der Hebung und der Dauer der unge störten Erosion abhängig sind.

Für die zweite Hebung ist vor allem der Zeitpunkt ihres Eintrittes wichtig. Je nachdem wird sie ein reifes, ein spätreifes oder ein greifenhaftes Relief zu neuer Bearbeitung übernehmen. So wie bei jeder normalen Abwicklung der Erosionsreihen stets die größeren Täler vermöge ihres Wasserreichtumes den kleineren vorausseilen, so geschieht dies auch bei einer allgemeinen Neubelebung des Gefälles. Die reichsten Wasserstränge sägen zuerst, dem Zuge des neuen Gefälles folgend, in die Tiefe. Ihnen folgen in entsprechenden Abständen dann die kleineren und kleinsten Gäden.

In den einzelnen Talbereichen wird sich daher zuerst eine Stufe gegen das Haupttal ausbilden, die dann der Seitenbach langsam in sein Tal hinein verschiebt.

Die Einwärtsverlegung der Stufe, die durch das viel raschere Tieffägen des Haupttales entstanden ist, erfolgt größtenteils durch die Arbeit von Wasserfällen.

Wir haben schon früher darauf hingewiesen, daß die Wasserfälle im allgemeinen bei der Taleinwanderung nicht kleiner, sondern höher werden. Es kommt dies daher, weil die Erosionsleistung an der Aufsprungstelle vielmals größer als an der meist glattgeschliffenen Absprungstelle ist. So stellt sich unterhalb des Wasserfalles eine meist viel flachere Talstrecke ein, als oberhalb vorhanden ist. (Fig. 11.) Außerdem können sich aber im Laufe der Entwicklung die mächtigen Wasserfälle durch das Einholen und Aufsaugen der benachbarten kleinen vergrößern.

Die höheren Stürze greifen ihren Untergrund viel scharfer an als die niedrigeren. Infolgedessen rücken die großen Wasserfälle rascher talein als die kleinen. Es entsteht auf diese Weise ein „Wettlaufen der Wasserfälle“, wobei die großen meist die kleinen besiegen.

Wir haben heute in zahlreichen Seitentälern der Alpen Gelegenheit, diese Taleinverlegung der Mündungsstufe in den Klammern zu verfolgen. Wir finden in vielen Fällen, daß man in den Klammern oft eine große Strecke mit sehr geringem Anstieg vordringen kann und daß man erst an ihrem Ende den großen Wasserstürzen begegnet. Natürlich ist für die Anlage vieler Wasserfälle in erster Linie die geologische Struktur die Grenze zwischen weichen und harten Schichten, entscheidend.

Ebenso darf man nicht vergessen, daß der Vorsprung zwischen Haupt- und Seitental stets nur ein relativer ist, der dem Verhältnis der Wassermengen entspricht. Ein Seitental mit reichlichem Wasser wird daher dem Tieffägen des Haupttales rascher folgen als ein wasserarmes.

Endlich ist aber auch nicht ausgeschlossen, daß eine solche Gebirgshebung ebenfalls wieder vielleicht nicht in einem, sondern in mehreren Rucken erfolgte und daher mancher Zwischenwasserfall nur die Abbildung einer solchen Teilhebung vorstellt.

Wenn wir uns auf den Boden dieses Erklärungsversuches begeben, so hätten wir also in dem feinzerschlitzen Relief des Hochgebirges mit seinen Rämmen und Karen den Überrest des Reliefs einer alten Hebung vor uns. In dieses reife Relief wurde durch eine neuerliche Hebung ein tieferes Relief eingefenkt, dessen Hauptmerkmale und Standzeichen in den Hochtälern die Trogtäler mit ihren Trogschlüssen sind.

Endlich hat noch eine dritte Hebung stattgefunden, die sich in den Steilstufen an den Tal-mündungen verrät und deren Impuls wir die scharfe Erosion in den Mündungs-kammern zuzuschreiben haben. (Fig. 13.)

Die Erosion der ältesten hier betrachteten Hebung dürfte nach der feinen Zerschlitze-

lung der Rämme und der sorgfältigen Raumlagerung der Karanlage wohl das Stadium der Reife erlangt haben, bevor die Neuerosion der Täler infolge der zweiten Hebung begann.

Diese Erosionsphase ist offenbar eine viel kürzere gewesen und sie war bei weitem nicht imstande, innerhalb des Hochgebirges die Reste des früheren Reliefs völlig zu zerstören und sich anzugliedern. Noch weit geringer ist das Ergebnis der letzten Hebung, an dem noch heute weitergearbeitet wird. Es hat demnach den Anschein, als ob die Bedeutung und auch die Andauer der späteren Hebungen ständig abgenommen hätte. Diese Hebungen setzen am Alpenrande nicht plötzlich, sondern mit allmählichem Anstieg ein, waren also im Verhältnis zur Alpenbreite nur ziemlich flache Aufwölbungen.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß jener Hebung, als deren Vermächtnis wir die oberste Skulptur des Hochgebirges begreifen, noch ältere vorausgegangen sind, von deren Formenschatz uns nichts mehr unmittelbar überliefert wurde. Es fragt sich nun, wie die Eiszeiten diesen hypothetischen Hebungen zuzuordnen sind?

Für die sehr unsicheren zwei ältesten Eiszeiten von U. Penck und C. Brückner fehlen uns alle Behelfe, da im Innern der Alpen keine ihnen zugehörigen Ablagerungen zu finden sind. Dagegen wissen wir, daß zur Zeit des Rückzuges der vorletzten Vergletscherung sowohl die Haupt- als auch die Seitentäler ungefähr so tief wie heute ausgeschnitten waren. Die Mündungsklammern der Seitentäler waren auch schon so ziemlich in der heutigen Form entwickelt.

Nach dem Rückzug der vorletzten Vergletscherung erfolgte in der anschließenden Interglazialzeit bei trockenem Klima eine mächtige Verschüttung der Alpen.

Die Höttingerbreccie mit ihren Pflanzenresten stammt aus dieser Zeit, wo sich z. B. das Karwendelgebirge bei Innsbruck fast bis zu den Rämmen in Schutthalben ver mummtete. Eine Zeit lebhafter Niederschläge befreite die Alpen wieder von dieser Schuttbelastung. Später traten infolge von Senkungen des Alpenkörpers in den Großtälern der Ostalpen mächtige Fluschauffüllungen ein, die von den Haupttälern in die Seitentäler eindrangen. Heute weisen uns z. B. die schönen Terrassen des Inntales auf diese Vorgänge hin. Erst nach dieser Auffüllung begannen die Gletscher neuerdings zu wachsen und schoben sich endlich bis über den Rand der Alpen vor.

Was wir also von den Eiszeiten geologisch sicher belegen können, muß jünger als die letzte Alpenhebung sein. Wir kommen mit unserer Untersuchung also zu dem Ergebnis, daß das Relief der Alpen im wesentlichen lange vor dem Eiszeitalter angelegt wurde. Weder die Einteilung der Karräume, noch die Linienführung der Hochgebirgskämme, noch auch die Trogtäler und Trogschlüsse können als reine Erzeugnisse der Eiserosion bezeichnet werden.

Die Vergletscherung hat die Kare bereits als verlassene Talenden eines ausgeschalteten alten Reliefs, die Trogtäler als vorgegedrungene Schluchten einer neuen Erosionsphase vorgefunden und zu den heutigen Formen umgestaltet. Insofern tragen diese Formenreihen allerdings den Prägungstempel der Eisarbeit deutlich genug an sich. Es ist aber doch nur eine Umprägung älterer Modelle von normaler Erosion.

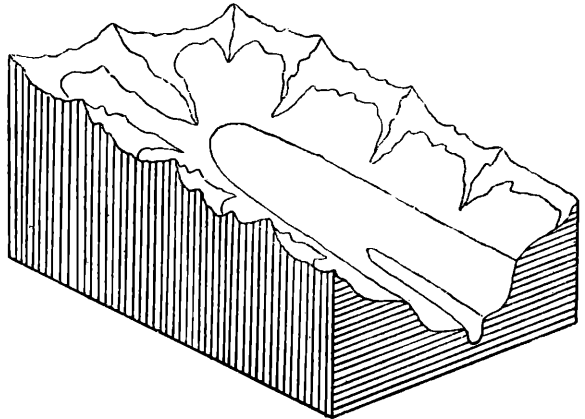


Fig. 13.

Neu geschaffen sind vom fließenden Eise wohl die meisten der hochalpinen Felsseen und bei den großen alpinen Randseen ist seine Mitarbeit sehr wahrscheinlich. Im Gegensatz zu einer rein glazialen Erklärungsweise wird hier der heute in lebhaftester Erosion befindliche Raum der Klammern als Vergleich für die Entstehung der Trogtäler herangezogen.

Der phasenweise, rasch erfolgende Tiefschnitt der Haupttäler wird verhältnismäßig langsam als Wasserfallstufe in die Seitentäler hineingeschoben. Während im Haupttal das jüngere Stadium meist das höhere ältere ganz zerstört, bleiben die Standmarken in den Seitentälern viel besser erhalten, da sie meist weit auseinander liegen.

Wir können da gleichsam in starker Vergrößerung auf dem Horizontalmaßstab der Seitentäler die Verschiebungen am Vertikalmaßstab des Haupttales herunterlesen. Die Trogklüfte stellen in dieser Beleuchtung also bis in den Hintergrund der Seitentäler verschobene ehemalige Mündungsstufen dar.

Die hier befürwortete Ableitung der hochalpinen Formenwelt zerlegt sie einerseits in die Gebilde von wenigstens drei je durch Hebungen unterbrochene und neubelebte Erosionsphasen, andererseits weist sie den Vergleitscherungen eine wesentliche Amprägung aller von ihnen untersuchten Gebiete zu.

Es wird ein Gegenstand weiterer Studien sein, inwieferne in verschiedenen Tälern der Alpen und besonders auch in anderen Gebirgen sich kleine und große Abweichungen von diesem Rhythmus von Hebungen und wohl auch von zwischengeschalteten Senkungen bei genauerem Zusehen zu erkennen geben.

Neue Verwandtschaften lassen sich vielleicht auf diesem Wege zwischen entfernten Gebirgen, neue Fremdheiten zwischen benachbarten erschließen.

Die Geschichte der Gebirge erscheint uns viel reicher gegliedert, immer mehr tritt der Gedanke an deren einheitliche Schöpfung zurück und es öffnen sich unserem geistigen Blicke weite Mannigfaltigkeiten.

Die Sprache der Alpenformen verstehen zu lernen, ist aber für jene, die sich gerne an das Hochgebirge schmiegen und in seiner Erhabenheit ihre eigene Seele suchen, eine stille und freundliche Beschäftigung.

Es ist Gewinn von derselben Art, wie ihn die Kenntnis von Sprache und Sitte der Einwohnerschaft eines fremden Landes dem Reisenden auf Schritt und Tritt verbürgt.

### Kartenhinweise und Erläuterungen der Bilder.

Es war ursprünglich geplant, dem Aufsatze einige Ausschnitte aus den Uegerterschen Alpenvereinskarten beizufügen. Infolge der Einschränkungen, die der Krieg erzwang, mußte jedoch davon abgesehen werden. Da sich aber die hier besprochenen Karten im Besitz aller Vereinsmitglieder befinden, können die folgenden Hinweise auf besonders charakteristische Stellen immerhin als Ersatz dienen.

Als Beispiel für ein reif zerschnittenes Hochgebirgsgelände mag auf der Karte der Adamello- und Presanella-Gruppe (Zeitschrift 1903) der Südfall des Cimon di Chiese zum Val di Genova gelten.

Dieser zum Aufbau der Presanella gehörige Gebirgstheil besteht durchaus aus Tonalit und zeigt in seinem über 2000 m hohen Abfall in ausgezeichneter Weise eine streng einheitlich geregelte Furchung und Scheitelung.

Man vergleiche mit dieser in hartem Granit ausgeführten Erosionsregelung jene in der weichen Grundmoräne bei Boden im Lechtal.

Als Muster der Zurückschneidung der Mündungsstufe in das Seitental sei auf der Karte der Lechtaler Alpen (Zeitschrift 1911) der Eingang in das Sulzetal bei Holzgau angegeben. Das Tal durchbricht hier vorzüglich stehende Hauptdolomitschichten, die quer in ostwestlicher Richtung streichen. Der Weg überwindet die bereits ein



Aufnahme Kilophot G. m. b. S., Wien 19

Abb. 9. Taltrog des Schlegeistales. Im Vordergrund die Olperer Hütte



Aufnahme Kilophot G. m. b. S., Wien 19

Abb. 10. Schalferner im Öhtal



Aufnahme Kiloppot G. m. b. S., Wien 19

Abb. 11. Talleit- und Kreuzspitze von der Breslauer Hütte



Aufnahme Kiloppot G. m. b. S., Wien 19

Abb. 12. Aussicht von der Wildspitze

Stück zurückgeschobene Steilstufe im Sidjad und läuft dann auf der Verbreiterung des alten Troghodens hoch über der jungen Klamm talein.

Für die allmähliche Annagung von alten Flächenstücken durch neubelebte Eroffion bietet auf der Karte der Lechtaler Alpen (Heiterwand-Muttetopf-Gebiet, Zeitschrift 1912) der Senftenberg nördlich von Schönwies im Oberinntal ein gutes Vorbild. Das zumeist aus steilauferichtetem, wohlgeschichtetem Triasdolomit bestehende Gebirge trägt eine alte Abschrägungsfläche (Grubig-Joch—Grubig—Rühpleis), die von allen Seiten, am schärfsten vom Inntal her, durch Runsen angegriffen wird. An der Nordseite sind auch die Wände des Nactkars in diese Fläche hineingeschnitten.

Eine prachtvolle radiale Zertalung zeigt der hochmächtige Tonaltleib des Adamello. Ausgezeichnet ist auf der Adamello-Preanellakarte der Einsatz der gegen Süden ausstrahlenden Täler dargestellt, die in selten reiner Erhaltung ihre Trogformen bewahrt haben. (Karte der Adamello- und Preanellagruppe, Zeitschrift 1903.)

Über dem Taltrog flüchtet das Gehänge weit zurück und die Kare öffnen sich. Mit scharfen, fein zertellten Formen sind dann die Hochgebirgsklämme daraufgesetzt. Der Nordabfall des Gebirges ist mit breiten Gletschern zugedeckt.

Ebenfalls aus einer gewaltigen, einförmigen Gesteinsmasse, dem Zentralgneis, ist das Relief der Hochalmspitze-Gruppe (Karte der Antogel-Hochalmspitze-Gruppe, Zeitschrift 1909) herausgeschnitten. Auch hier finden wir im Gohgraben, im Großelend-, Döffener- und Seebachtal deutlich ausgebildete Tröge. Besonders regelmäßig tritt uns dann im Gohgraben ein großartiger Trogschluß entgegen, der unmittelbar in einen weiten Rarring eingefenkt erscheint. Im Lessacher Winkel bemerkten wir, wie der Gletscher über den Trogschluß eine breite Schuttlehne angelegt hat. Auf diese Weise bauen zahlreiche Gletscher der Alpen über entgegengesetzte Stellungen „Rampen“ herab. Bei der Arthur-v.-Schmidt-Hütte sehen wir einen vom Eise geschaffenen Karhohlraum noch heute mit einem See erfüllt. Auch in dieser Berggruppe ist die Nordseite die Hüterin der großen Gletscherfelder.

Auch die ganz aus flachliegenden Hauptdolomitschichten erbaute Eima-Tosa-Gruppe (Karte der Brentagruppe, Zeitschrift 1908) bietet dem Beschauer trotz des so verschiedenen Materials und der hier lebhaft betonten Schichtung denselben Formenkreis.

An der Eima Tosa selbst dürften wir unter der schönen Eisklappe den letzten Rest einer alten Oberfläche zu erkennen haben. Ringsher sind tiefe Kare eingesnagt, die von Gletschern bewohnt werden. In die breiten Böden dieser Kare aber sehen wir mit mächtigen Stufen die Trogtäler hereingreifen, besonders eindrucksvoll im Val Nardis. Auch hier weisen die Gletscher wie „Magnetnadeln“ gegen Norden.

Von den beigefügten Photographien zeigt das Bild der Grundmoräne bei Boden im Lechtal den Typus der reifen, feingegliederten Zerschneidung eines sonst glättflächigen Gehänges (Abb. 1, S. 73).

Das Relief des Triglav von S. Rohn gibt den übermächtigen Schluß des Urataltals wieder, der in eine hohe, alte Abtragungsfläche eingeschnitten ist. Darüber ragt frei für sich die schöne Pyramide des aussichtsreichen Triglav auf (Abb. 2, S. 73).

Der Blick von der Mittenwalderbahn in das Inntal bei Zirl weist uns die breite Bank der Schutterrassen, die hier gerade vor den Tälern der Kalkkugelskette steht. Diese Terrassen sind bei einer beträchtlichen Senkung des Gebirgskörpers aufgeschüttet worden (Abb. 3, S. 74). An einer Stelle fand dann der Inn beim Wiedereinschnitten in die gehobene Auffüttung sein altes Bett nicht mehr, sondern sägte daneben eine enge Felschlucht aus. Das Bild dieser Innenge zwischen den Stationen Roppen und Imst der Arlbergbahn bildet somit die Ergänzung zu der früher geschilderten Terrassenansicht (Abb. 4, S. 74).

Drei Bilder beschäftigen sich mit den Karformen.

Das erste Bild bringt die Aussicht vom Hochstabl gegen den Wildensender (Zienzer



Dolomiten). Wir sehen hier in den aus Wettersteinkall, Cardita-Schichten und Hauptdolomit gebildeten Gebirgswall das große Lavanterkar und noch zwei kleinere Kare quer hereingebrochen (Abb. 5, S. 83).

Das zweite Bild bringt sodann die Aussicht von der Kleinen Sandspitze gegen Kreuzkofel und Eisenschuß mit dem breiten Karraum der Kerschbaumeralpe (Tienger Dolomiten). Dieser Karraum ist ganz in Hauptdolomitschichten eingeschnitten. Links bemerken wir am Simonskopf sehr deutlich eine bei hohem Eisstand ausgesprengte Einkerbung (Abb. 6, S. 83).

Das dritte Bild endlich stellt die gewaltige Nordwand der Eisarl-Spritzkar-Spitze im Karwendelgebirge dar. Hier sehen wir von links nach rechts vier Karräume eingeschnitten. Nur das Große Hochglücklar ist vollständig, die anderen werden von der großen Wandflucht abgeschnitten. Die Anlage der Karräume muß älter als diese Wandflucht sein, weil sie davon abgeschnitten werden. Das Gebirge besteht aus einer mächtigen Platte von Muschel- und Wettersteinkall, die als Überschiebungsbede auf weichen, viel jüngeren Schichten ruht. Durch die Untergrabung dieser weichen Schichten wird der Nachbruch der riesigen Wandflucht erzwungen, die so zwar langsam aber stetig zurückweicht. Zur Zeit der Anlage der Karräume war die Kalkplatte noch viel ausgedehnter. Ein großer Teil der Platte samt den Vorderteilen der Kare ist schon zerstört worden. Weil der Zuschnitt der Wand gegen rechts weiter vorgeschritten ist, scheinen die Kare in dieser Richtung anzusteigen. Das Bild zeigt sehr deutlich das hohe Alter der ersten Karanlage und die viel spätere Aussprengung durch eingestülpte Gletscher (Abb. 7, S. 84).

Die Ansicht des Eisenschuß (Tienger Dolomiten) vom Hallebach-Törl soll die Verschüttung des Gebirges vor Augen führen. In ähnlicher Weise, aber in weit größerem Umfang wurden in der letzten Interglazialzeit große Teile der Alpen in ihrem eigenen Schutt erstickt (Abb. 8, S. 84).

Vier weitere Bilder heben den Einfluß der Vergletscherungen auf die Formenwelt der Alpen hervor. Die Photographie des Schlegeistales (Zillertaler Alpen) bildet einen ausgezeichneten Falldrog ab (Abb. 9, S. 93).

Auf dem Bild des Schalfnerers (Ohtaler Alpen) sehen wir über dem niedrigen heutigen Eisstand noch drei Randlinien deutlich bezeichnet. Die unterste gibt sich als Nachhanggrenze zu erkennen. Die mittlere und besonders die oberste sind als Marken langer Hochstände in fortlaufenden Kerben eingemeißelt. Es sind gute Beispiele für die Aussprengungen an den „Schwarzweißgrenzen“ (Abb. 10, S. 93). Sehr schön ist diese Aussprenggrenze auch unterhalb der Breslauer Hütte im Ventertal und gegenüber an der Talleit-Kreuzspitze zu verfolgen. Hier ist zudem auch die breite, gleichmäßige Abschleifung der Gehänge unter dem Trogrand sowie die helle Ausweitung des Gebirges oberhalb desselben sehr gut zu erkennen (Abb. 11, S. 94). Das letzte Bild ist ein kleines Stück aus der großartigen Rundflucht der Wildspitze im Ohtal (Abb. 12, S. 94).

Hier verkündet sich über den weiten Firnschalen wieder das feingegliederte Höchstgebirge als eigene Formenwelt.