

Ueber
Denudation der Erdoberfläche.

Von

DR. ALBRECHT PENCK

k. k. Universitäts-Professor.

Vortrag, gehalten den 23. Februar 1887.

An jedem Punkte des festen Landes nagt unablässig die Verwitterung. In unserem Klima ist es die vereinte Wirksamkeit der Feuchtigkeit und der Wärmeschwankungen, welche die Gesteine lockert, und zu gleichem Ziele führt das Eindringen von Pflanzenwurzeln in den Boden; in den Wüsten, wo Niederschläge und Vegetation fehlen, bewirkt die jähe Erhitzung während des Tages und die rasche Abkühlung während der sternhellen Nacht dasselbe. Nicht minder ausgedehnt aber ist die Wirkung jenes Wassers, welches die Gesteine chemisch verändert, manche löst und andere zersetzt. Es erfährt die feste steinige Erdkruste allenthalben an der Sohle des Luftmeeres eine mehr oder minder grosse Zertrümmerung, aber die Producte der letzteren bleiben nur selten am Orte ihrer Entstehung liegen. Der Felsblock rollt, sobald er vom Berge losgesprengt ist, zu Thal, der Verwitterungslehm der Hügelländer wird durch Regengüsse fortgeschwemmt, der Wind ergreift den gelockerten Wüstenboden, und das in der Tiefe sich bewegende Wasser beladet sich stets mit messbaren Mengen gelöster Substanzen. So

werden die Verwitterungsproducte grösstentheils verschleppt, wodurch eine fortwährende Entblössung des Felsbodens erzielt wird. Diese Entblössung ist Denudation genannt worden, letztere also besteht in einer Fortführung der Verwitterungskruste und bedingt eine allmälige Abtragung des festen Landes, welche grosse Strecken nach und nach erniedrigt.

Diese Abtragung erfolgt nicht allenthalben gleich rasch, sondern geschieht mit sehr wechselnder Stärke. In dem einen Lande schreitet die Verwitterung sehr rasch vorwärts, schnell lockert sich das Gefüge des festen Felsens, allein es fehlt an einer Kraft, welche die Zersetzungsproducte zu verschleppen im Stande wäre; letztere bleiben liegen, die festen Gesteine nach und nach dick ummantelnd, es kommt zu keiner beträchtlichen Denudation. Dies ist in ausgedehnten Landschaften der Tropen der Fall. In anderen Ländern wiederum schreitet die Verwitterung nur äusserst langsam vorwärts, wie z. B. auf Kalksteinhochländern, aber die geringfügigen Producte werden sofort erfasst, um weiter transportirt zu werden. Bald ist daher der nackte Fels wieder entblösst, allein dennoch hat keine nennenswerthe Abtragung stattgefunden. Dagegen wird die Denudation dort sehr gross sein, wo die Erzeugnisse einer rasch fortschreitenden Verwitterung leicht entfernt werden. Solches geschieht namentlich in den Hochgebirgen an schroffen Felswänden. Sobald hier nur ein Theilchen gelockert wird, fällt es sofort zur Tiefe. Der unablässige Steinfall im Hoch-

gebirge zeugt von schneller Denudation, und in der That verändern die Hochgipfel von Jahr zu Jahr ihre Form. Simony erkannte am Dachstein die Stellen kaum wieder, auf welchen er vor vierzig Jahren campirte. Wenn aber in Hochgebirgen ein Stein herabgefallen ist, so bleibt er selten dort liegen, wohin er zunächst gerathen ist. Er ist vielleicht auf eine Schutthalde gestürzt, hier wird er leicht von herabrieselnden Wassern, leichter aber noch durch Lawinen weiter geschoben, bis er schliesslich vom Wildbache ergriffen wird und mit dessen Wassern aus dem Gebirge verschwindet. Oder es ist der Stein auf einen Gletscher gefallen, er hat sich zu dessen Oberflächenmoräne gesellt und wandert nun mit derselben zwar langsam, aber ununterbrochen thalabwärts. Es sind alle Gebirge der Schauplatz einer verhältnissmässig beträchtlichen Denudation, weil hier die grossen Höhenunterschiede benachbarter Punkte unmittelbar oder mittelbar eine namhafte Steigerung der Transportkräfte verursachen. Je grösser die relativen Höhen einer Landschaft sind, desto rascher wird diese vermöge der Zunahme der Transportkräfte denudirt werden. Die Grösse der Denudation wächst mit den Höhenunterschieden; sie ist in Ebenen sehr klein und erhält in Hochgebirgen ihren stattlichsten Betrag.

Gegenüber diesen Hauptabstufungen des Denudationsbetrages stehen die übrigen sehr zurück, welche durch weitere Schwankungen der Transportkräfte bedingt sind. Die Kraft des rinnenden und rieselnden

Wassers, welches vielfach Verwitterungsproducte umlagert, nimmt mit seiner Masse zu, in regenreichen Klimaten sollte daher die Denudation schneller erfolgen als in regenarmen; im Allgemeinen würden daher die Randgebiete der Festländer rascher abgetragen werden als die Centralregionen, die fast regenlosen Wüsten müssten langsamer als die angrenzenden Savannen und Steppen und diese wieder weniger schnell als die Gebiete tropischen Regenreichthums erniedrigt werden. Allein dies Verhältniss wird mehr oder weniger compensirt; mit dem grösseren oder geringeren Reichthum an Niederschlägen geht Hand in Hand die Entwicklung der Vegetation und diese bewahrt ihrerseits wieder den Boden vor der Abtragung. Jener tropische Urwald, welcher das Land so dicht bedeckt, dass der Boden durchaus von Pflanzen verhüllt ist, hält natürlicher Weise auch alle Verwitterungsproducte fest und schützt sie vor der Wegführung; in der Savanne hingegen ist die Bindung der Bodenbestandtheile eine geringere, die Trümmer können leichter fortbewegt werden; in der Wüste endlich fehlt mit der Vegetation der Halt des Erdreiches, und dasselbe wird ein Spiel des Windes. Die Entfaltung der Denudation, welche in den regenreichen Tropen stattliche Grössen annehmen würde, wird hier gehemmt durch die dichte Pflanzendecke, sie wird andererseits in den Wüsten begünstigt durch die Nacktheit des Landes.

Dies Alles bezieht sich natürlich nur auf die Denudation der Producte mechanischer Verwitterung.

Anders stellt sich das Verhältniss bei der chemischen Zersetzung. Dieselbe ist in den Wüsten gleich Null. Hier fehlt das Wasser, welches lösend und umlagernd wirken könnte, in den tropischen Waldgebieten hingegen, wo eine stattliche Durchfeuchtung des Bodens bis zu grosser Tiefe stattfindet, entfaltet sich die chemische Verwitterung am ansehnlichsten; der Urwald mit seinen Vermoderungsproducten stattet zudem das Wasser noch mit Säuren aus, welche die chemische Wirkung desselben steigern, und in den Flüssen wandern sehr beträchtliche Mengen gelöster mineralischer Substanzen zum Meere. Gerade also dort, wo die mechanische Zerstörung am meisten gehindert ist, entfaltet sich die chemische am grössten. Es schliessen sich in wärmeren Klimaten die Gebiete mechanischer und chemischer Verwitterung gegenseitig aus. Wenn daher entschieden werden soll, wo die grösste Denudation stattfindet, ob im Urwalde, ob in der Wüste, so ist das Mass der mechanischen und chemischen Verwitterung zu ermitteln, dies aber ergibt sich aus der Neigung verschiedener Gesteine zu verwittern. Dieselbe ist sehr verschieden. Das eine Gestein, wie z. B. thoniger Sandstein, zerfällt sehr leicht, es bildet sich rasch Sand, welcher von den transportirenden Kräften verschleppt wird, andere, wie sehr viele Kalksteine, zertrümmern nur langsam und schwer, während sie um so leichter löslich sind und daher gewöhnlich nur der chemischen Denudation zum Opfer fallen. Weitere Gesteine, wie z. B. der Granit, zerklüften langsam

und sind unlöslich in Wasser, aber sie zersetzen sich allmählig bei steter Durchfeuchtung, erfahren hierbei eine Lockerung ihres Gefüges, gehen in Grus über, und dieser wird von den transportirenden Kräften ergriffen. Es zeigt sich allenthalben, dass solche Gesteine, welche wie der Kalkstein nur schwer in Schutt zerfallen und auf der andern Seite leicht lösbar sind, langsamer abgetragen werden als solche, welche zwar unlöslich sind, aber leicht in Trümmer übergehen, wie z. B. manche Sandsteine, Schieferthone u. s. w. Es schreitet die mechanische Verwitterung rascher von statten als die chemische; Gebiete, in welchen sie herrscht, werden schneller abgetragen als jene Länder, in welchen blos eine Lösung und Auslaugung der Gesteine stattfindet.

Hiernach lässt sich ungefähr ein Ueberblick über die Intensität der Denudation einzelner Theile der Erdoberfläche gewinnen. Am raschesten werden die Hochgebirge abgetragen, welche über die Baumgrenze bis zu einer Temperaturzone aufragen, in der ein häufiger Wechsel von Frost und Aufthauen stattfindet. Ihre Oberfläche ist nicht durch den Wald befestigt, ihre Felsen werden durch das häufige Gefrieren des Bergschweisses gelockert, die entstandenen Trümmer fallen zu Boden oder werden durch Wasser, Schnee oder Eis leicht verfrachtet.

In gebirgigen Gegenden wird die Abtragung einen mittleren Betrag haben, welcher; je nachdem sich Waldbestände über die Landschaft breiten, verschieden

gross sein wird. Waldgebirge werden im Allgemeinen langsamer erniedrigt werden als kahle Küstengebirge, in welchen der Sturm den Baumwuchs hindert und reiche Niederschläge herabprasseln; aber auch Wüstengebirge, in welchen der Sturm faucht und alle feineren Bestandtheile verweht, in welchen ferner ab und zu wolkenbruchähnliche Regengüsse herabfallen, werden leicht denudirt werden. Am geringsten wird die Abtragung der Ebenen sein. Sind dieselben mit Vegetation bestanden, so werden sie nur durch allmälige Auslaugung erniedrigt werden, was sehr langsam geschieht; sind sie dagegen nackt und kahl, so wird sich zwar in ihnen auch die mechanische Zertrümmerung entfalten, allein zu derselben werden sich nur verhältnissmässig untergeordnete transportirende Kräfte gesellen. In den Polarregionen wird die Frostwirkung den Fels zerkleinern, aber nur die feinsten Trümmer werden von den Schmelzwassern der winterlichen Schneedecke ergriffen und verfrachtet werden; die grösseren Blöcke bleiben liegen. Nicht anders ist es in den Wüsten. Nur die feinsten der abgesprungenen Felssplitter werden vom Winde verweht, die gröberen bleiben an Ort und Stelle. Uebersäet ist der Boden der Wüste und der polaren Flachländer mit grossen Felstrümmern, welche trotzdem, dass sie lose daliegen, nicht von den transportirenden Kräften verschleppt wurden, ebenso wie die Ebenen grosser Waldgebiete mit dicken Schichten von Verwitterungslehmen bedeckt sind, welche durch die Pflanzendecke festgehalten werden.

Möge sie nun aber auch rascher oder langsamer von statten gehen, ununterbrochen wirkt die Denudation einem einzigen Endziele zu, nämlich das Land nach und nach zu erniedrigen, bis es nur noch eine so unbedeutende Höhe hat, dass die Entwicklung der Transportkräfte sich auf ein sehr geringes Mass beschränkt. Es strebt die Denudation dahin, das Land zu nivelliren, sie frisst an den Hochgebirgen und verwandelt dieselben in Mittelgebirge, sie nagt an den letzteren und gestaltet sie schliesslich in Flachländer um, welche nur noch durch ihre innere Structur verrathen, dass sie einst hohe Gebirge bildeten, wie z. B. das südliche Schweden oder das westliche Belgien. Das sind die Rumpfgebirge. Dieser Process wird sich allmählig an jedem Gebirge vollziehen, und so würden schliesslich die Festländer flache Buckel bilden, von welchen langsam die Flüsse herabrinnen, um nur noch in geringstem Masse gelöste und suspendirte Substanzen zu verfrachten. Es wird dann ein Stadium erreicht sein, in welchem die Denudation zwar noch nicht gleich Null, aber verschwindend klein geworden ist, man kann die Oberfläche der dann entstandenen Continentalrumpfe als unteres Denudationsniveau bezeichnen; diese Fläche hat für die Gestaltung des Landes eine besondere Bedeutung, sie bezeichnet das Ziel, nach welchem hin die Denudation strebt.

Aber dieses Ziel ist bei Weitem noch nicht erreicht, und dürfte wohl auch schwerlich erreicht werden, denn unablässig erfolgt eine Veränderung im Gefüge

der Erdkruste. Es heben sich die einen Schollen, die anderen senken sich; rege bleibt die Tendenz, Unebenheiten zu bilden. Allein wie stark auch die gebirgsbildenden Kräfte sich entfalten, so sind doch die Resultate, welche sie erzielen, wie es scheint, begrenzt. Es wachsen die Berge nicht in den Himmel, und die Beträge von Verschiebungen einzelner Theile der Erdkruste sind weit beträchtlicher als die wirklichen Unebenheiten des Landes. Auf mitteleuropäischem Boden sind manche Theile um mehrere Tausend Meter verworfen worden. Die oberrheinische Tiefebene ist mindestens 3000 Meter tief zwischen ihren Rändern eingesunken; das Saarbrückner Kohlengebiet ist von einer Kluft durchsetzt, deren einer Flügel 4000 Meter höher liegt als der andere, die Judicarien- und Pusterthallinie lassen Einsenkungen von 4000—5000 Meter Höhe erkennen; in Nordamerika sind Verwerfungen von 6000 Meter beobachtet worden, und Nathorst meint im südlichen Schweden eine solche von 8000—10.000 Meter Sprunghöhe zu erkennen. Würde man die Schichtfalten der Alpen, des Himalaya und der Pyrenäen sich wieder vollkommen hergestellt denken, so würde man hoch über die heutige Gipfelwelt gerathen. Die Schichten, welche den Südrand der Ardennen aufbauen, lagern in der Mitte des Gebirges 12 Kilometer tief, die Gesteine am Südwestfuss des Böhmerwaldes sind in der Gegend von Prag vielleicht in 30—40 Kilometer Tiefe zu suchen, um diesen ausserordentlichen Betrag haben hier Verschiebungen der Erdkruste stattgefunden.

Trotzdem nun solch gewaltige Dislocationen auf dem Lande gewirkt haben, gehen die bestehenden Unebenheiten nicht über ein bestimmtes Mass hinaus. Dies tritt zunächst im einzelnen Gebirge deutlich entgegen. Hier ist überraschend, dass die höchsten Gipfel sich immer an annähernd gleiches Niveau halten, aus welchem Material sie auch bestehen mögen. Die höchsten Zinnen der nördlichen Kalkalpen, die Scesaplana, die Parseyer Spitze, die Zugspitz, der Hochkönig und der Dachstein haben fast übereinstimmende, kaum um 100 Meter von einander abweichende Höhen (2938—3038 Meter); obwohl sie aus sehr verschiedenen Gliedern der Schichtenfolge bestehen; z. B. wären die Gesteine der Parseyer Spitze erst etwa 500—1000 Meter hoch über der Zugspitze zu erwarten. In den Centralalpen wiederholt sich dasselbe; die Wildspitze (3776 Meter) und Weisskugel (3741 Meter) in den Oetzthaler Alpen, der Venediger (3659 Meter) und Grossglockner (3797 Meter) in den Hohen Tauern gipfeln nahezu in demselben Niveau, obwohl z. B. das Glocknergestein erst 1000—2000 Meter über dem Venedigergestein in der Schichtenfolge entgegentritt. In den Südalpen endlich haben Presanella (3561 Meter), Adamello (3557 Meter), Marmolata (3345 Meter) und Cimon della Pala (3334 Meter) annähernd dieselben Höhen, wiewohl man auf den Adamellostock noch eine 2500 Meter mächtige Schichtfolge auflegen müsste, um das Niveau der Dolomitengipfel zu erreichen. Entsprechendes gilt von den Pyrenäen, wo der Pic de

Néthou (3404 Meter) und Mont Perdu (3352 Meter) bis zu gleicher Höhe anstreben, wiewohl das Gipfelgestein des ersteren am Fusse des letzteren angetroffen wird, und man sohin auf die Maladetta noch 2000 Meter Gestein auflagern müsste um in das geologische Niveau des Mont Perdugipfels zu gelangen. Augenscheinlich bestimmt der geologische Aufbau nicht direct die Höhen der Berge, dieselben erscheinen in ein und demselben Gebirge wie mit der Scheere abgeschnitten. Hiermit steht im Einklang, dass, wiewohl auf der Landoberfläche Dislocationen im Betrage von 20—40 Kilometer vorhanden sind, der höchste Berg nur 8·8 Kilometer hoch ist. Den Verschiebungen der Erdkruste wirken allenthalben Kräfte entgegen, welche die verschobenen und gefalteten Massen bis in ein bestimmtes Niveau abschneiden, dies ist die Denudation. Letztere steigert sich mit der Höhe, wie oben auseinandergesetzt. Je höher ein Berg wird, desto kälter wird seine Umgebung, desto mehr vereinigen sich Frost und Hitze, um ihn abzutragen, und es wird schliesslich in einer bestimmten Höhe der Fall eintreten, dass die Denudation raschere Fortschritte macht als die Erhebung des Berges oder Gebirges. Es muss ein Niveau geben, in welchem die Denudation so gross geworden ist, dass sie dem Aufthürmen von Bergen vollkommen entgegenarbeiten kann, so dass über dasselbe kein Gipfel hinauswachsen kann. Dies ist das obere Denudationsniveau. Dasselbe dürfte keine durchaus feste Lage besitzen, da es bestimmt wird durch die Grösse der

gebirgsbildenden Kraft und der Denudation, welche ihrerseits in ihrer Intensität Schwankungen aufweisen können. Für jeden gegebenen Zeitpunkt aber wird sich dies Niveau empirisch dadurch ermitteln lassen, dass man die Höhe der Berge ermittelt. Allein es dürfte sich wohl kaum empfehlen, hierbei sämtliche Gipfel in Betracht zu ziehen, schliesslich würde die durch dieselben gelegte Fläche sich nahezu der Erdoberfläche anschliessen, es heisst eine Auswahl treffen. Man könnte vielleicht sich auf den höchsten Gipfel beschränken und sagen, die durch die Spitze des Gaurisankar gelegte Niveaufläche stellt das obere Denudationsniveau dar. Allein es ist eine bemerkenswerthe Thatsache, dass die höchsten Gipfel einzelner Länder weit hinter dem genannten zurückstehen, und namentlich ist unverkennbar, dass die Gipfel in den Polargebieten hinter denen niederer Breiten weit zurückstehen. Verbindet man die höchsten Erhebungen der einzelnen Zonen der Erdoberfläche, so erhält man eine Curve, welche sich in den Polarregionen nur etwa 4000 Meter über den Meeresspiegel erhebt, dann allmählig ansteigt, unter dem 45. Parallel auf über 6000 Meter anschwillt und ihre Culmination auf beiden Hemisphären nahe dem Wendekreise findet, wo sie im Norden im Gaurisankar 8800 Meter, im Süden im Aconcagua, bezüglich den rivalisirenden Gipfeln des bolivianischen Hochlandes nahe an 7000 Meter Höhe erreicht, während sie am Aequator sowohl in Afrika als auch in Südamerika unter 6000 Meter wieder herabgeht.

Die so verlaufende Curve kann als Schnittlinie einer Meridianebene mit dem oberen Denudationsniveau betrachtet werden; letzteres würde sohin als ein Rotationsellipsoid von etwas grösserer Abplattung als das der Erde anzusehen sein, und dies muss in der That so erwartet werden. Denn wenn als oberes Denudationsniveau jene Fläche gelten soll, über welcher die Abtragung so rasch erfolgt, dass sie jedwelche Hebung ausgleichen kann, so muss dieselbe in den Polarregionen, wo vermöge der niedrigen Temperatur, des häufigen Frostes und der Nacktheit des Landes die Zerstörung sehr rasch fortschreitet, tiefer liegen als in geringeren Breiten, wo die unteren Partien des Landes nur eine geringe Denudation erfahren. Das obere Denudationsniveau, als Product gewisser klimatischer Verhältnisse, welche die Abtragung des Landes begünstigen, muss in seiner Höhenlage in gewisser Beziehung zu den klimatischen Zonen stehen. Dies aber erhellt deutlich aus dem oben angegebenen Verlaufe desselben, welcher nahezu parallel mit dem der Schneegrenze ist. Letztere steigt von den Polen zum Aequator hin an, sie erreicht aber auf beiden Hemisphären ihre grösste Höhe nicht unter dem Gleicher selbst, sondern ganz ebenso wie die Berggipfel auf beiden Seiten derselben etwa unter den Wendekreisen. Sie wiederholt demnach selbst Einzelheiten des Denudationsniveaus, und es kann letzteres auch als eine Fläche definirt werden, welche 2000—3000 Meter über der unteren Grenze des Reiches des ewigen Schnees gelegen ist. Dieses

aber ist ein Gebiet erhöhter und besonderer Zerstörung, in seinem Umfange ist die Abtragung der Berge am lebhaftesten, am intensivsten wirkt hier die Denudation. Der Umstand nun, dass sowohl die Gipfel von echten gefalteten Gebirgsketten und die Höhen aufwärts bewegter Schollen, der Massengebirge oder Horste, wie endlich auch die schlanken Vulkankegel nicht sehr beträchtlich über die Schneegrenze aufragen, lehrt überzeugend, dass, welcher Art und welcher Intensität auch die Bewegungen der Erdkruste sind, sie schliesslich doch völlig überwunden werden von den denudirenden Kräften.

Zwischen dem oberen und dem unteren Denudationsniveau bewegen sich die Unebenheiten der Landoberfläche, und der jeweilige Abstand beider Flächen bezeichnet die Höhe jener Schichte, in welcher die gebirgsbildenden und denudirenden Kräfte der Erde mit einander streiten. Jede Hebung des Landes bedingt auch eine Steigerung der Denudation, diese aber wird in ihrer Entfaltung ausserdem noch beeinflusst von der Widerstandsfähigkeit der einzelnen Schichten, die einen werden rascher, die anderen langsamer entfernt werden, und so wird die Denudation, wiewohl sie das Land zu nivelliren trachtet, auch ihrerseits Unebenheiten schaffen, sie wird innerhalb der beiden Denudationsniveaux die widerstandsfähigen Gesteine aus den leicht entfernbaren förmlich herausarbeiten, und zwar um so intensiver, je grösser die durch die gebirgsbildenden Kräfte bedingten Höhenunterschiede sind; im Maximum

werden durch die örtlich wechselnde Verschiedenheit der Denudation Unebenheiten entstehen können fast so gross wie der Abstand der beiden Denudationsniveaux. Allein dieser Fall ist ein ebenso hypothetischer, wie es die Denudationsniveaux sind. In Wirklichkeit ragen nur sehr wenige Gipfel bis an die maximale Höhengrenze, die meisten bleiben weit unter derselben, und kaum je wohl wird das untere Denudationsniveau erreicht werden. Vielmehr wird gerade dort, wo namhafte Unebenheiten vorhanden sind, die Erreichung desselben gehindert werden. Je lebhafter die Abtragung der Gipfelwelt eines Gebirges ist, desto langsamer werden dessen tiefste Stellen erniedrigt werden. Es werden die Felstrümmer der Berge sich in den Thälern anhäufen, an Stelle der fortschreitenden Entblössung der Erdoberfläche tritt hier eine starke Verschüttung derselben. Es wird die Denudation stellenweise durch die Accumulation ersetzt, und dies bedeutet eine zeitliche Erschwerung, das untere Denudationsniveau zu erreichen. In allen Ländern, in denen das rinnende Wasser als Haupttransportmittel für die denudirten Materialien dient, werden die Flussbetten die Rolle des unteren Denudationsniveaus spielen; bis zu deren Spiegel herab wirkt die Abtragung des Landes, und je nachdem der Fluss seinen Lauf vertieft oder erhöht, wird die Gegend sich dem unteren Denudationsniveau nähern oder von demselben zeitweilig entfernen. Kommen die beiden Denudationsniveaux für die Gestaltung der ganzen Erdoberfläche

in Betracht, so wird in jeder einzelnen Gegend eine Annäherung derselben wahrnehmbar sein, man wird von einem örtlichen oberen und einem örtlichen unteren Abtragungsniveau sprechen können. Das erstere wird bezeichnet durch die höchsten Erhebungen, das letztere durch die tiefsten Punkte, welche gemeinhin vom Wasser aufgesucht werden. Im nordöstlichen Böhmen zum Beispiel, im Quellgebiete der stillen Adler, begegnet man Erhebungen von 660 Meter, und es senken sich die Thäler auf 350 Meter herab. Man darf also für dieses Gebiet das locale obere Denudationsniveau durch die Höhenschichte von 660 Meter, das locale untere Denudationsniveau durch das Niveau von 340 Meter repräsentirt sehen, und entsprechend kann man in den Alpen verfahren. Die Höhenunterschiede eines bestimmten, enger umgrenzten Gebietes gewähren den Abstand der beiden Denudationsniveaux für diese Gegend.

Hiermit scheint auf den ersten Blick nicht viel gewonnen, und doch erschliesst diese Erwägung in überaus einfacher Weise das Verständniss der Landoberfläche. Denkt man sich einen Durchschnitt durch den geologischen Aufbau einer Gegend und in demselben das obere Denudationsniveau gezogen, so kann man aus diesem Durchschnitt ohne Weiteres die Reliefverhältnisse entnehmen, sobald man nur einigermaßen die Widerstandsfähigkeit der Gesteine kennt. Die oben erwähnte Gegend des nordöstlichen Böhmens besteht aus ziemlich resistenten Quadersandsteinen des

Kreidesystems, unter welchen weiche Mergel des Rothliegenden lagern. Beide Gesteine bilden eine flache Falte, eine Mulde im Westen und einen Sattel im Osten. Im Sattel nun ist das weiche Rothliegende so hoch aufgewölbt, dass es das obere Denudationsniveau der Gegend erreicht. Ueber ihm ist also alles Material entfernt, es geht zu Tage, und es ist gleich den daneben lagernden Quadersandsteinen der Denudation ausgesetzt; diese aber schreitet im weichen Mergel rascher fort als im harten Sandstein, an Stelle der Aufwölbung des Rothliegenden hat die Denudation eine flache Mulde ausgearbeitet, deren Boden bis zum unteren Denudationsniveau herabreicht, ganz ebenso wie zufälliger Weise der Boden der westlich gelegenen Schichtmulde. Das ist das Becken von Mährisch-Trübau.

An der Grenze von Böhmen und Preussisch-Schlesien bildet derselbe Quadersandstein und das Rothliegende eine Mulde, welche derart gelegen ist, dass ihr tiefster Punkt gerade in das obere Denudationsniveau fällt, während sich die beiden Muldenflügel hoch über jenes Niveau erheben. Stehen geblieben ist hier der Muldenkern, aber in den benachbarten Aufbiegungen des Rothliegenden hat sich die Denudation entfaltet und hier Vertiefungen bis in das untere Abtragungsniveau eingefressen. Aus der geologischen Mulde ist orographisch ein Berg geworden. Das am tiefsten gesenkte Schichtglied bildet einen Berg, das am höchsten gehobene dagegen Senken. Aehnliches wiederholt sich ausserordentlich häufig auf dem Boden Mitteleuropas,

nur selten entspricht dem geologischen Bau die Oberflächengestaltung, und es ist daher schon bezweifelt, ob sich das Relief eines Landes unmittelbar aus dem geologischen Bau erklären lasse. Thatsächlich gelingt dies, sobald man das durch die Höhenzahlen gegebene obere Denudationsniveau der Gegend in Betracht zieht. Dasselbe erschliesst unmittelbar das Relief aus der geologischen Structur, indem alle festen Gesteine, mögen sie nun gehoben oder gesenkt sein, sobald sie an das obere Denudationsniveau grenzen, Aufragungen bilden, während andererseits alle weichen Gesteine, sobald sie an jenes Niveau stossen, als Vertiefungen entgegen-treten, welche bis in das untere Denudationsniveau herabreichen können. Je niedriger das Land gelegen ist, das heisst, je mehr sein locales oberes Denudationsniveau sich dem allgemeinen unteren nähert, desto geringer werden die auf obigem Wege durch die Denudation erzeugten Unebenheiten sein, wogegen mit zunehmender Höhe auch das Ausmass der durch die ungleiche Abtragung des Landes geschaffenen Reliefformen wächst, selbst wenn hie und da dieselben Gesteine an die Landoberfläche treten.

Man kann hieraus leicht entnehmen, welche ausserordentlich wichtige Rolle die Denudation bei Gestaltung der Landoberflächen spielt, und in der That treten ihre Werke allenthalben in grossartigster Weise entgegen. Von allen Punkten des festen Landes sind mehr oder weniger mächtige Schichten weggenommen worden, spurlos sind ganze Formationen von grossen Strecken

entfernt. Im nördlichen Böhmen tritt in reicher Entfaltung das Kreidesystem entgegen, nach Süden bricht dasselbe mit einem scharfen Abfalle ab, und nunmehr kommt seine Unterlage ans Tageslicht. Jenseits der Grenzen Böhmens, in der Gegend von Regensburg erheben sich dann die Schichten der Kreide von Neuem, und es muss als höchst wahrscheinlich gelten, dass dieselben auch einst über dem ganzen südwestlichen Böhmen verbreitet gewesen sind, die Vorkommnisse von Regensburg mit den nordböhmischen verbindend, denn beide sind, wie aus der in ihnen enthaltenen fossilen Fauna hervorgeht, in demselben Meere abgelagert worden. Es lässt sich wohl aussprechen, dass jedes isolirte Vorkommen einer jüngeren Meeresablagung im Bereiche von älteren auf eine lebhaftere Denudation des Umkreises schliessen lässt. So erstrecken sich zum Beispiel mitten im nordfranzösischen Becken die Ablagerungen eines eocänen Meeres. Dasselbe muss mit den übrigen Meeren in Zusammenhang gestanden haben, irgendwo im Umkreise des Beckens sind die eocänen Schichten denudirt worden. Dies ist im Norden geschehen, und hier finden sich noch ganz vereinzelt Ueberreste derselben in Form von isolirten Bergen, welche gekrönt werden von einer Dache örtlich entfalteter harter Schichten. Dieselben schützten ihre Unterlage vor Zerstörung.

Namentlich die Untersuchung Mitteleuropas hat in neuester Zeit sehr schätzbare Anhaltspunkte für die Grösse der Denudation gewährt. Eine sehr eingehende

geologische Untersuchung führte vielfach mitten im Bereiche älterer Gesteine zur Entdeckung weit jüngerer eingesunkener Schichten, von deren Existenz man früher keine Ahnung hatte. Man hat die Ueberzeugung gewonnen, dass in Hessen über dem dort herrschenden Buntsandstein einst noch der Muschelkalk, Keuper und Lias entfaltet waren. Diese etwa 700 Meter mächtigen Gebilde sind gänzlich denudirt worden bis auf jene Partien, welche vermöge einer grossartigen Verwerfung unter das obere Denudationsniveau gerathen sind. Die deutschen Gebirge, der Wasgau, Schwarzwald, der Thüringerwald und Harz haben je eine Abtragung von 1500 Meter Höhe erfahren, während in den dazwischen gelegenen Senken auf eine ungleich geringere Erniedrigung zu schliessen ist.

In den Alpen ist die Denudation gleichfalls äusserst beträchtlich gewesen. Ueber dem Centralgebirge Tirols war einst die Triasformation in einer Mächtigkeit von 2000 Meter entfaltet, heute ist sie hier gänzlich entfernt bis auf einzelne Partien, welche in der Brennergegend unter das obere Denudationsniveau gesunken sind. Von den Gipfeln der Kalkalpen aber sind die einst vorhandenen Juraschichten mit einer Dicke von 1000 Meter fortgenommen. Ueber die karnischen Alpen und die Karawanken ist vordem die gesammte Triasformation in einer Mächtigkeit von 3000 Meter gebreitet gewesen, und sie ist hier gänzlich fortgenommen, aber nördlich davon, in den Gailthaler Alpen tritt sie entgegen, hier ist sie unter das obere Denudationsniveau

ingesunken, während sie in den karnischen Alpen über dasselbe gerathen ist. So begegnet man allenthalben in den Alpen ausserordentlich beträchtlichen Denudationsbeträgen, und man begreift, dass das heutige Gebirge nur noch eine Ruine des früheren ist.

Allein selbst diese Beispiele würden kaum genügen, um die Denudation in ihrer ganzen Grösse zu erkennen. Sie lehren nur, wie viel die bestehenden Gebirge bereits verloren haben trotz der Jugendlichkeit ihres Alters. Lebhafter noch führen die gänzlich abgetragenen Gebirge den vollen Umfang der Denudation vor Augen. Dort, wo heute sich im westlichen Belgien ein Flachland mit nur 25—100 Meter Höhe erstreckt, bestand vormals ein gewaltiges Alpengebirge. Aus dem Gefüge von dessen Sockel lässt sich erkennen, dass dasselbe einst bis zu Höhen von 6000 Meter aufgeragt hat. Aber keine weitere Andeutung mehr findet sich von demselben, es ist ganz eingeebnet, und zwar lediglich durch die Wirkungen der Denudation. Es lässt sich dies mit aller Bestimmtheit erweisen; die Schichten, welche sich über den Rumpf des Gebirges ausbreiten, sind Werke der Denudation. Da treten Verwitterungslehme, dort Flussgeröll und Gebirgsschutt entgegen, und darin auftretende Pflanzenreste erweisen alle diese Schichten als Landbildungen, über welchen erst die Meeresabsätze folgen. Aehnlich liegen die Dinge in Böhmen. Auch hier bestanden einst grossartige Gebirge, welche nördlich und südlich vom Thale der Beraun Höhen von an 5000 Meter erreicht haben

mögen. Dieselben sind gänzlich eingeebnet und waren es schon, ehe die letzte Meeresbedeckung der Gegend erfolgte, denn unter den Gesteinen derselben erstrecken sich allenthalben Süßwasserbildungen. Dies wiederholt sich noch an manch anderer Stelle Europas; überall, wo ein alter Gebirgsrumpf entgegentritt, ist derselbe zunächst bedeckt von Landbildungen, und erst über denselben lagern Meeressedimente. Hieraus geht hervor, dass die Gebirgsrümpfe Europas nicht etwa dadurch entstanden, dass die Brandung alter Meere die Höhen zerfrass und nach und nach gänzlich abspülte, also abradirte; bevor das Meer mit seiner Brandungswelle über die alten Gebirge hinweggriff, waren diese schon eingeebnet und mit Landbildungen bedeckt.

Dieser Einebnungsprocess aber erfolgte stets erstaunlich rasch. Gegen Ende des geologischen Alterthums hatten sich in Mitteleuropa Gebirge erhoben von stattlicher Höhe und gewaltiger Ausdehnung. Eine wahre Alpenkette erstreckte sich über das Land zwischen Maas und Oder, und es haben sich zugeschüttete Thäler derselben erhalten, welche mehrere Tausend Meter tief waren. Aber bereits am Schlusse des Alterthums der Erde war dies gewaltige Gebirge eingeebnet. Es war entstanden in einer Periode, und bei Beginn der nächsten existirte es bereits nicht mehr, während die gegenwärtigen deutschen Mittelgebirge bereits seit der letzten geologischen Periode, die Alpen sogar seit der vorletzten bestehen. Man

möchte daraus schliessen, dass gegenwärtig die Denudation weit langsamer erfolge als in älteren geologischen Perioden. Allein dieser Schluss ist deswegen nicht stichhaltig, weil die geologischen Perioden nicht Zeiträume von gleicher Dauer sind; die älteren waren wahrscheinlich umfangreicher als die jüngeren, und daher fehlt ein Mass, die Intensität der früheren Denudation mit der gegenwärtigen zu vergleichen; nur so viel wird sich sagen lassen, dass in den verschiedenen und wechselnden Klimaten der Vorzeit wahrscheinlich der Betrag der Abtragung immer ein ziemlich schwankender war.

Das denudirte Material geht dem festen Lande grösstentheils verloren und wandert zum Meere. Hier lagern sich die mechanisch zerkleinten, rollend oder schwebend im fliessenden Wasser transportirten Substanzen ab, während die gelösten durch organische Thätigkeit wiederausgeschieden werden. Es entstammen die Meeressedimente dem festen Lande, und sie erst geben ein bestimmtes Mass für die ganze Grösse der Denudation. Die Absätze früherer Meere aber erstrecken sich in sehr stattlicher Mächtigkeit über die gegenwärtigen Festländer. Die von untergegangenen Erdtheilen weggenommenen Materialien bauen das gegenwärtige Land auf und zeugen von früheren Denudationen; aber nur kurze Zeit bleiben sie liegen, schon verwittern sie wieder, schon werden sie von Neuem abgetragen und abermals abgelagert. Das vollzieht sich gegenwärtig und vollzog sich früher,

unablässig und ununterbrochen wirkt die Denudation, unablässig und ununterbrochen aber fördern die gebirgsbildenden Kräfte den Meeresgrund wieder an die Landoberfläche. Es wandert die oberste Schichte der Erdkruste, und es ist wohl nicht zu viel gesagt, wenn behauptet wird, dass die oberste 2000 Meter mächtige Schichte der Erdoberfläche seit Urzeiten mindestens einmal, wahrscheinlich aber viel öfter irgendwo denudirt worden ist.

Man hat versucht Vorstellungen vom Masse der gegenwärtig von statten gehenden Denudation zu erlangen, indem man die Aufmerksamkeit auf die Materialien lenkte, welche die Flüsse den Meeren zuführen und daraus ermittelt, dass das Land im Durchschnitt in 10.000 Jahren um 1 Meter erniedrigt wird. Diese Rechnungen haben nur geringen Werth, denn ausserordentlich schwer nur lässt sich wirklich die Summe aller dem Meere zugeführten denudirten Substanzen ermitteln. Daher erscheint der geistreiche Versuch nicht ganz gerechtfertigt, aus dem gegenseitigen Verhältniss der gegenwärtig denudirten Materialien und der in der Vorzeit abgetragenen und wieder abgelagerten zu folgern, dass sich das Alter der Erde auf 28,000.000 Jahre beläuft, denn in keiner Weise lässt sich erweisen, ob die Denudation vordem schneller oder langsamer als gegenwärtig erfolgte. Nur Eines wird sich wohl behaupten lassen: lange Zeiten waren nöthig, um so viele Materialien abzutragen, als in den fossilführenden Schichten abgelagert worden sind; uralt ist das Wechselspiel zwischen Denudation

und Gebirgsbildung; dasselbe wird aber fortbestehen, so lange eine Atmosphäre die Erde umgibt, in welcher das Wasser seinen Kreislauf vollzieht. So lange als es regnet, so lange als Frost und Hitze an der Erdoberfläche wirken, so lange ein Wind weht und ein Fluss fließt, wird sich unablässig die Abtragung der Landoberfläche vollziehen, werden die Meere die weggeführten Materialien aufspeichern. Wohl wird dieser Process dann und wann scheinbar stocken, so wie es gegenwärtig in manchen Ländern der Fall ist, welche nicht durch belebende Wasseradern mit dem Meere verbunden sind, und in welchen die von der einen Stelle abgetragenen Gesteinsmassen sich auf der andern benachbarten wieder anhäufen, und wo daher ebenso wie in einem Gebirge, dessen Gipfel abgetragen werden, während die Thäler zugeschüttet werden, die beiden localen Denudationsniveaux sich einander nähern, indem sich das untere hebt. Allein dies bedeutet nur ein vorübergehendes Ereigniss. Es macht die Erreichung des endgiltigen Zieles nicht unmöglich, sondern verschiebt dieselbe nur. Die Länder sind dazu bestimmt, abgetragen zu werden, während der Ocean zugeschüttet wird. Hier wird stets neuer Boden entblösst, dort immer neuer geschaffen, gebirgsbildende Vorgänge tauchen den einen unter den Meeresspiegel und heben den andern aus demselben hervor. Es schwankt und wandert der Boden, auf welchem die menschlichen Geschicke spielen, und diese schwanken und wandern mit demselben.
