

Gefahrenmomente. Das Studium burgenländischer Verhältnisse wirft auch im Hinblick auf eine gewisse Ursprünglichkeit der Ortsbilder Licht auf Entwicklungsphasen unseres einheimischen, im Zyklus der Entwicklung, der großstädtisch-westlichen Beeinflussung weiter vorgeschrittenen ländlichen Siedlungswesens. Doch damit rühren wir an Dinge, die bereits einen Schritt von unserem Ausgangspunkt sachte in die Vergangenheit zurückleiten, und von denen hier nicht weiter gesprochen werden soll.

Beiträge zur gesetzmäßigen Erfassung des Formenablaufs bei ständig bewegter Erdrinde und fließendem Wasser.

Von Dr. Otto Lehmann.

I. Stand der Forschung.

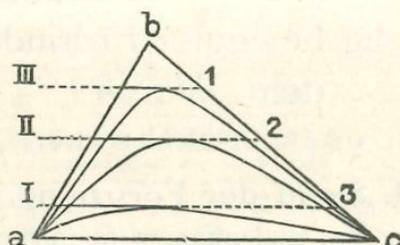
Die Entwicklung der Bodenformen bei stetig langsam bewegter Erdrinde zu verfolgen, ist ein Gedanke, den schon die Lehre Davis' kurz erwogen hat, obwohl sie den normalen Ablauf der Stadien unter der Annahme einer nach rascher Gebirgsbildung ruhenden Rinde ausgearbeitet hat. Davis glaubte das Problem, das da gestreift wurde, mindestens vorläufig dadurch zu lösen, daß er für Fälle langsamer und dauernder Gebirgsbildung die Reihenfolge der Stadien beweglich hielt und so auch von „reif“ geborenen Tälern sprach. Will man z. B. eine Entwicklung von langsamsten Hebungen ins Auge fassen, die eine zunehmende Geschwindigkeit erlangen, um wieder sich zu verzögern,¹⁾ so wäre es nur die Anwendung des erwähnten Gesichtspunktes von Davis, wenn man von einer gleichzeitigen Verjüngung der Formen und einem darauf folgenden verzögerten Ausreifen und Altern sprechen würde. Eine neue Fragestellung trat da erst hervor, als sich Gründe dafür fanden, daß die während einer Bewegung „reif“ geborenen Formen gar nicht so benannt werden dürfen,²⁾ weil sie anders aussehen als die reifen nach W. M. Davis. Seitdem war es kaum noch zweifelhaft, daß man wichtige Unterschiede zwischen wirklichen jungen und den während einer Bewegung nur sozusagen verjüngten Formen finden müßte. Die

¹⁾ Dieses Beispiel wähle ich, da es dem von W. Penck ausgearbeiteten Fall entspricht, von dem noch öfter die Rede sein wird. (Berichte über die Verh. d. sächs. Akad. d. Wissensch., Leipzig, math.-phys. Klasse, 72. Bd. 1920, II. S. 65 f., Teubner 1921.)

²⁾ Vgl. meinen Aufsatz: Tal- und Flußwindungen usw. Z. d. Ges. f. Erdk., Berlin 1915. (Dort soll es im Abschnitt 2, Zeile 17 von oben, lauten: „Windungen“ und nicht „Talwindungen“), ferner: Die Talbildung durch Schuttgerinne. Penck-Festband, Stuttg. 1918 (S. 48) S. 59 u. 60, wo das Problem allerdings mit Absicht nur gestreift wird.

Anwendung der Ausdrücke jung, reif und alt wird damit für Rindenteile in Bewegung nicht etwa aus dem belanglosen Grunde der freien Reihenfolge abgelehnt oder sehr eingeschränkt, sondern man kann die erklärende Beschreibung bei stetig bewegter Erdrinde entstehende Landschaften diesen Ausdrücken nicht mehr oder nicht allein überlassen.

Das Problem läßt sich am besten an einer Zeichnung erläutern. Sie will und kann nicht mehr sein, als eine rohe Versinnlichung von Tatsachen und Gedankengängen. Das Dreieck könnte sphärisch sein und alle Linien anders gekrümmt; das täte nichts zur Sache.³⁾



Die Dreieckseiten ab und bc stellen die Lehre von Davis im strengsten Grenzfall dar: ab die Entstehung unversehrter tektonischer Ausgangsformen, bc den Ablauf der drei Stadien (1, 2, 3) als Werk der Außenkräfte bei ruhender Rinde. Die Hebung auf ab kann man sich beschleunigt oder verzögert denken, nur muß sie rasch genug sein, damit die tektonischen Ausgangsformen nicht vor dem Stillstand der Rinde merklich verändert werden. ac ist jener unwirkliche Grenzfall der Abtragung bewegter Schollen, wo die Außen- und Innenkräfte einander von Anfang an die Wage halten derart, daß überhaupt kein Relief entsteht. Somit umfaßt die Dreiecksfläche alle Möglichkeiten morphologischen Geschehens. Die Kurven im Innern stellen Beispiele für die in der Natur in unendlicher Mannigfaltigkeit verwirklichten Formabläufe dar, gültig bei einem langsam beginnenden, beschleunigten und wieder sich bis zum Stillstand verzögernden Hebungsvorgang. Die unterste Kurve zeigt den Fall an, wo die Außenkräfte die ständig langsam steigende Rinde nicht über ein Flachrelief emporkommen lassen, während die obere den Fall darstellt, wo die Krustenbewegungen immerhin Hochgebirgsformen zu erzeugen ver-

³⁾ Diese Zeichnung ist möglichst analog zu jener W. Pencks gehalten, die er in dem schon erwähnten Aufsatz: „Wesen und Grundlage der morphologischen Analyse“ bringt. Meine Zeichnung stellt aber kein „Diagramm“ dar, wo Kräfte nach den Grundsätzen eines Parallelogramms zerlegt werden, darum ist auch mein Dreieck nicht rechtwinkelig. Wollte man daraus Feineres machen als im Text gesagt wird, so wäre ein rechtwinkeliges Koordinationssystem dazu zu denken, dessen x -Achse die Zeit, dessen y -Achse die Höhe bedeutet. Damit dann das eine Dreieck alle möglichen vertreten kann, darf man sich die Einheiten der x -Achse gleichzeitig mit verschiedenen Längen denken.

mögen, die allerdings das Gepräge der gleichzeitig mit der Hebung tätigen Außenkräfte tragen. Die Parallelen I, II, III enthalten lauter Punkte, wo die zugehörigen Hebungsgeschwindigkeiten des Reliefs ein kurzfristiges Gleichgewicht der Außen- und Innenkräfte mit sich bringen könnten, bevor die Abnahme mit ihren Folgen eintritt. In den Fällen I, II, III ist aber nicht nur der Unterschied der relativen Höhen, sondern auch der Formenschatz jeweils ein anderer. Die Hypothese von den konstanten oberen Denudationsniveaux von A. Penck findet als solche in den Parallelen zu ac ihren formalen Ausdruck im allgemeinen Rahmen morphologischen Geschehens. War einmal der Gedanke als berechtigt erkannt, daß man die Stadienformen 1, 2, 3 nicht mit denen eines Gleichgewichtsfalles nach III, II, I zusammenfallen lassen darf, so lag das Problem vor, für I, II, III eine eigene Reihe von Musterformen zu finden, verschieden von denen der Stadien. In diesem Sinne habe ich meine Untersuchungen fortgesetzt und sie harren des Druckes. Sobald die Morphologie beide Reihen besitzen wird, können alle Formen als Annäherungen an die Musterformen in diesen Reihen beschrieben werden.

Die Aufstellung eines förmlichen Zyklus bei bewegter Rinde empfahl sich noch nicht, solange die Untersuchungen der Musterformen noch nicht abgeschlossen waren, besonders auch, weil die Reihe der Stadien umzubauen war, seit Naturformen aus der theoretisch behaupteten Zugehörigkeit zur Linie bc in die Reihe der römisch bezifferten Fälle zu treten hatten; ⁴⁾ endlich erforderte selbst der Entwurf eines solchen Zyklus auch eine richtige Weiterbildung der mechanischen Vorstellung vom Verhalten der Längsprofile der Flüsse bei Hebungen und eine passende Auswahl aufeinanderfolgender Hebungsgeschwindigkeiten. Leichtlich war der Versuch, einen solchen Zyklus abzuleiten, die Mühe nicht wert, wenn man einen tektonisch irgendwie naturwidrigen Fall annahm. Dieser letzten Zweifel war W. Penck durch seine in einem Teil der Anden gefundene Gebirgsbildungshypothese enthoben. Er fand dort nicht nur einen „Primärrumpf“ aus der Zeit der langsamsten Hebungsvorgänge, sondern auch die Beschleunigung der Hebungen bis zur Hochgebirgsbildung und das Langsamerwerden. ⁵⁾ Diese Reihenfolge der Geschwindigkeiten

⁴⁾ So sind z. B. breite Rücken zwischen sohlenlosen V-Tälern kein Merkmal der Reife, wie Davis annahm, sondern andere hier nicht zu besprechende Erhebungen. Dafür gehören sie etwa in die Lage II der aufsteigenden Entwicklung.

⁵⁾ Der Südrand der Puna de Atacama; Des XXXVII. Bandes der Abh. der math.-phys. Kl. der sächs. Akad. d. Wissensch. Nr. I, Leipzig 1920. Die geologisch-geophysische Erklärung in der Gebirgsbildungshypothese von W. Penck tut hier nichts zur Sache. „Primärrumpf“ ist ein glücklich gewähltes Wort für diese zuerst wohl von Richthofen nördlich des „Roten Beckens“ gefundene und beschriebene Erscheinung (China, III. Bd.). Seither ist ein solcher Anfangsrumpf auch von anderer Seite als morphologische Forderung bzw. Erklärung wiederholt herangezogen worden. (Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, 1917, S. 424 und Penck-Festband, 1918, S. 84).

bot den tektonischen Rahmen einer Deduktion und erlaubte es, die Kurven der Zeichnung als naturgemäß möglich zu entwerfen, die alle bei a beginnen, d. h. in der Lage eines werdenden Primärrumpfes, und die bei c, dem Abschluß des Endrumpfes, aufhören. Die Vorteile dieses Standpunktes liegen auf der Hand: Jede Hebung mit zunehmender Geschwindigkeit kreuzt eine unendliche Anzahl der Parallelen zu ac, womit sich die Formen der Reihen I, II, III einstellen. Wenn die Geschwindigkeit der Hebung sinkt, sind alle Formen auf dem Wege, sich den Stadien im Sinne Davis' anzupassen. Nunmehr erschien weder ein Beginn der Kurvenstücke, höher als in a, noch ein Ende über c in der Begrenzung des Dreieckes von vornherein als die einfachere oder mehr naturgemäße Annahme, sondern die Kurven zu W. Pencks tektonischen Voraussetzungen übernehmen damit den Vorzug der Einfachheit, der vorkommenden Wirklichkeit und jenen großer logischer Allgemeinheit, wie in den unmittelbar vorangegangenen Sätzen erläutert ist. Andere Fälle konnten späterer Forschung vorbehalten bleiben.

W. Penck unterschied demnach eine „aufsteigende Entwicklung“, wo die Hebung durch zunehmende Geschwindigkeit den Abtrag übertrifft und eine „absteigende“, in der das Gegenteil eintritt; dazwischen liegt ein zeitweiliges theoretisches Gleichgewicht. Er vermied es mit Recht, von Verjüngung oder verzögertem Ausreifen zu sprechen. Die Beseitigung der einen Schwierigkeit, welche dem Versuch eines solchen Zyklus schon in den tektonischen Voraussetzungen, wenigstens psychologisch entgegenstehen konnte, reicht aber nicht hin. Genug bleibt noch zu bewältigen, sowohl auf dem mechanisch-dynamischen Gebiete des Fließens und Erodierens wie auch auf dem morphologischen der Musterformen. W. Penck hat diese Schwierigkeiten in den sachlichen Unterlagen stark unterschätzt. Darum ist es nötig, denselben Versuch, gerade unter den Bewegungsannahmen W. Pencks noch einmal in Angriff zu nehmen. Die Ergebnisse, zu denen die neue Ableitung kommt, sind in so manchem unvereinbar mit jenen W. Pencks. Die ernsthafte Bedeutung dieser Unterschiede kann hier nur in Anmerkungen mit Hinweisen auf W. Pencks Schrift gestreift werden.

II. Mechanische Erosion und Akkumulation.

Möge es niemand übel vermerken, wenn er im Folgenden für ihn selbstverständliche Wahrheiten finden wird. Es soll dadurch vermieden werden, daß Verstöße gegen sie um sich greifen.

Das Wasser schneidet Täler ein, wenn es im Lauf langer Zeiten mehr erodiert als akkumuliert. Im umgekehrten Falle werden die Talsohlen erhöht.⁶⁾ Das Wasser erodiert in die Tiefe, wenn es vom Untergrunde Bestandteile losbringt und fortschafft.

⁶⁾ Da dieser Abschnitt die Verhältnisse aufsteigender Entwicklung im Auge hat, wird die Erhöhung der Talsohlen, d. h. das Überwiegen der Akkumulation, nicht näher gewürdigt.

Die Erosion ist also stets und immerdar mit Transportarbeit verbunden und bedeutet eine Vermehrung der Transportlast, die sich bei ausgeglichenem Gefälle bekanntlich talabwärts in einem durchschnittlich zunehmenden Maße bemerkbar macht. Jede mechanische Erosion hat das Auftreten fester Stoffe im Wasser zur sofortigen Folge. Daher gibt es keine Erosion ohne deren Vorhandensein und es kommt nicht in Betracht, ob auf die Dauer leeres Wasser mechanisch erodieren könne, zumal von ihm nur chemische Wirkungen erkennbar geworden sind. Es ist auch nebensächlich, ob die Erosion zuerst mit Massen arbeitet, die von außen ins Bett gelangten. Das Überwiegen der Erosion bedeutet die Tieferlegung des Flußbettes samt seinem mehr oder weniger beweglichen Inhalt.

Das Wasser schüttet auf, wenn es feste Stoffe auf dem Untergrund zur Ruhe kommen und liegen läßt. Wo Gerölle sich am Flußgrunde, in langsamerer Bewegung bleibend, anreichern, entspricht es weder der Sache, noch dem Sprachgebrauch von Akkumulation zu reden; denn es wird dabei an derselben Stelle weiter erodiert. Die Akkumulation ist eine Lastenverminderung, die als solche zum Aufhören der Transportarbeit führt. Sie wird bei ausgeglichenem Gefälle und ruhender Rinde zuerst im Unterlauf dauernd wirksam, sobald die bei der Erosion zu bewältigenden Transportlasten hierfür dauernd zu groß werden. Es ist verbreitet, aber manchmal schädlich, nicht nur den Vorgang der Akkumulation oder der Aufschüttung so zu nennen, sondern auch die abgelagerten Massen. Zeitweiliges Vorwiegen der Erosion ist gewöhnlich mit Hochwässern, jenes der Akkumulation mit Annäherung an den Tiefstand der Flüsse verbunden.

Erosion und Akkumulation als Vorgänge können überdies an benachbarten Stellen des Bettes sowohl bei Hochwasser, als auch bei Niederwasser zugleich im Gange sein. Dies ist sogar häufig so, wobei aber die eine oder die andere mehr ausrichtet. Die Gleichzeitigkeit beider kann bewirken, daß eine bewegte Geröllmasse an einer Stelle den Felsgrund erodiert und an einer andern oberflächlich erhöht wird. Auch wenn das zweite nicht eintritt, kann die Erosion in den Felsgrund morphologisch belanglos sein, weil sie die bewegte Masse von unten her nur dicker macht. Bei Niederwasser bleiben selbst in den Oberläufen einzelne Gerölle und Sandhäufchen liegen, im Mittellaufe sind es in ausgeglichenen Tälern Haufen, unterhalb zusammenhängende Schotterlager, („Geröllpflaster“, technischer Ausdruck) deren Korn sich weiterhin verfeinert. Bei Hochwasser können diese Massen alle in Bewegung kommen. Beim Geröllpflaster, dem ja die Zerreibsel des Untergrundes zuwachsen, ist dies auf die Dauer nur möglich, wenn es immer wieder von obenher verdünnt wird.⁷⁾

⁷⁾ Man kann geradezu von einer Erosion in zwei Stockwerken reden. Ich beobachtete bei einem Hochwasser der Mur, welches einen Geröllstrom in hörbare Bewegung gesetzt hatte (unbekannt wie tief), zur Zeit des Abfallens

Betrachten wir das Gesagte zwischen beliebig benachbarten Querschnitten. Auf einer Strecke wird das Tal vertieft, wenn im Durchschnitte eines längeren Zeitraumes mehr Stoffe den unteren Querschnitt verlassen, als den oberen betreten. Im umgekehrten Falle wird die Sohle erhöht. In diesem Zeitraum können Abschnitte, auch Zeiteinheiten vorkommen, in denen einmal die Zufuhr, das andermal die Abfuhr überwiegt. In zwei höchst verschiedenen Fällen entführt die Erosion alle oder so gut wie alle durch den oberen Querschnitt eintretenden festen Stoffe durch den unteren in einem Zuge: a) wenn ein ganzes Geschiebelager (-pflaster) ins Strömen kommt, b) wenn bei Geröllarmut alles Bewegliche, was wie immer in den Bach gerät, sofort mitgerissen wird, so daß das Bett felsig und „ausgeputzt“ erscheint. Da es sich nicht um eine gleichförmige Bewegung handelt, wird der Abtransport derselben Menge durch den unteren Querschnitt bald etwas rascher, bald etwas langsamer vor sich gehen als die Zufuhr durch den oberen. Daher können Zu- und Abfuhr kaum je in der Zeiteinheit einander entsprechen, sondern man könnte dafür nur durchschnittliche Werte in Rechnung stellen. Ein Gefälle nach Annahme b) erzeugt die schnellste am Orte mögliche mechanische Erosion. Würde es vermehrt, so käme die Zufuhr durch Verwitterung nicht nach, auch würde der Anteil des Energievorrates, der durch Spritzen, Zerstäuben usw. der Erosion ständig verloren geht, zunehmend größer. Es ist nicht erlaubt, ohne bedeutsame Einschränkung zu sagen, daß die Erosionsleistung mit dem Gefälle wachse. Am anderen Ende aller möglichen Erosionsgeschwindigkeiten steht ein Geröllager, das nur von den größten Hochwässern in sehr langsame Bewegung am Grunde versetzt wird. Eine geringe Gefällszunahme des wasserreichen Unterlaufes würde durch die Gerölleföhrung große Erosionsleistungen ins Leben rufen, eine große Gefällszunahme im stark geneigten blanken Felsbett unter Umständen die Erosionsleistungen wieder herabsetzen. Wo bei Niederwasser die Flußablagerungen nicht alles überziehen, ist ununterbrochene chemische Erosion möglich. Ihre Wirkung darf beim Hinblick auf langsame Krustenbewegungen nicht außeracht gelassen werden. Die Seitenneigung ist ebenfalls längs der ganzen Flüsse am Werke, abhängig auch von der Uferbeschaffenheit.

Zwischen den erörterten, für jede Wassermenge verschiedenen Grenzfällen der Schotterabfuhr liegen alle Geschwindigkeiten der Erosion, die in dem Flußlauf überhaupt vorkommen können. Zugleich ergibt sich, daß die Strecken einer unter Umständen steigerungsfähigen Tiefennagung zusammenfallen mit denen einer begrenzten und zeit-

des höchsten Standes und des den Hydrographen bekannten plötzlichen Klarwerdens, daß diese Verdünnung des Schotterlagers im Gange war. Von dem größtenteils oder ganz zur Ruhe gelangten Geröllpflaster wurden häufig einzelne Stücke abgerissen und schleunig weiterverfrachtet. Vielleicht geschieht dasselbe schon beim Anschwellen des Hochwassers, von der Trübe verhüllt.

lich unterbrochenen Akkumulation.⁸⁾ Mit der Talvertiefung ist stets die Seitennagung verbunden, wenn auch nicht mit jedem einzelnen Abschnitt mechanischer Tiefenerosion.⁹⁾ Von Sohlenbildung kann man aber erst sprechen, wenn mindestens bei Niederwasser ein Teil des von der Seitennagung neben dem Bett ausgebneten Geländes trocken liegt. Solches findet man nur in Verbindung mit Aufschüttungen. Die Sand- und Geröllhaufen vermehren nicht selten auch den seitlichen Ausschlag der Strömung und fördern noch die Sohlenbildung. Die Sohle fällt also nur mit einem Teile der Strecken begrenzter und zeitweiser Akkumulation zusammen.

Die Talsohle ist bei ruhender Rinde das letzte Werk des nicht mehr einschneidenden Flusses. Während der Talvertiefung in steigende Schollen ist aber nach allgemeiner Vorstellung jede Sohlenbildung ein dem Fortschritt der Tiefenerosion bald wieder verfallenes Gebilde, höchstens in der Form bescheidener Leisten zu bemerken. Die Erkenntnis, daß bei genügender Menge fester Stoffe im Fluß die Tiefennagung sozusagen in zwei Stockwerken arbeitet, führt jedoch weiter. Die Verdünnung der Geröllager des Hochwassers erfordert ja nicht, daß die Schotter auch bei niedrigerem Wasserstande überflossen sind. Sie kann auch so geschehen, daß die Seitennagung des auf einer Sohle pendelnden oder sich verzweigenden Flusses die Verdünnung besorgt, indem sie diese Geröllmassen abschert, während durch den bewegten Geröllstrom in der Linie raschesten Fließens der Untergrund abgenützt wird; dabei wird der Geröllstrom an der Außenseite der Krümmungen auch über die Unterlage der vor der Abscherung oft trocken liegenden Schottermassen seitlich hinweg geschoben, so daß er Streifen für Streifen abhobelt. Auf diese Weise können Talsohlen ungeachtet ihrer verschiedenen Breite als Ganzes tiefer

⁸⁾ Diese Aufschüttungen sind nicht dasselbe wie die „partielle Akkumulation“ in der eingangs erwähnten Schrift von W. Penck. Denn dort entspricht dem Worte keine bestimmte Vorstellung und begrifflich steht es wie folgt: Nach S. 83, Anm. 2, tritt die „partielle Akkumulation“ nämlich ein . . . , wenn ein Gerinne „sein Gefälle unter einen später zu definierenden kleinsten Wert ermäßigt“ (fehlt jeder Hinweis, wo später?) Aber auf S. 85 und 86 wird ein Gefälle als wichtig eingeführt, dessen Haupteigenschaft es ist, daß bei ihm „partielle Akkumulation“ gerade noch nicht eintritt. Man wird auch durch die weitere Angabe nicht aufgeklärt, daß dieses Gefälle der zugehörigen Wassermasse „wesentlich bei Hochwasser“ den Abtransport aller in der Zeiteinheit zugeführten Stoffe“ noch ermöglicht, was sehr vieldeutig ist, wie oben gezeigt wurde. Ob es auch noch zur angekündigten „Definition“ gehört, daß eine Wassermasse mit diesem Gefälle gleichzeitig ebenso rasch einschneidet als die Scholle emporrückt, ist zweifelhaft! Im Abschnitt IV werde ich die Unmöglichkeit des Gleichgewichtsgefälles nach W. Penck zusammenfassend darlegen. Jedenfalls aber ist die so verankerte „partielle Akkumulation“ ein Unbegriff und entspricht nicht der Vorstellung, die mein Text wiedergeben will.

⁹⁾ Dies gilt selbst in den Klammern. Eine Untersuchung über die Arbeit seitlicher Wirbel usw. erscheint demnächst in den Berichten der staatlichen Höhlenkommission. Wien 1922.

gelegt werden.¹⁰⁾ Es brauchen sich zum Beispiel die Windungen nur um mindestens eine halbe Wellenlänge talabwärts zu verschieben, während der Betrag der Tiefennagung durch den bewegten Geschiebstrom dessen eigene Dicke nicht erreicht; denn sonst wird sowohl die Abscherung der gewöhnlich trockenen Sohlenablagerungen als auch die genügend rasche Verschiebung des Mäanders mit dem Schotterstrom fraglich, weil sich dieser ganz in ein festes Bett versenkt. Aus dem Gesagten ergibt sich, daß die Möglichkeit der Sohlenerhaltung während des Einschneidens eine gewisse Langsamkeit der Tiefennagung voraussetzt, derart, daß es nicht zur Bettbildung in frischem, unverwittertem Fels kommt. Innerhalb dieser Langsamkeit sind aber viele Unterschiede der größten Sohlenbreite möglich, je nach der Geschwindigkeit des Fließens und daher auch nach dem Gefälle. Sind beide genügend gering, so kann das Määnderband eines Flusses und damit auch seine Sohle eine größere Breite erlangen; umgekehrt wird nur eine schmale Sohle dauernd möglich sein, bis auf die geringsten Werte herab. Allgemein bekannt ist der Einfluß der Wassermenge, die nicht nur ebenfalls die Breite des Määnderbandes bestimmt, sondern unter einer bestimmten Grenze auch eine so schwache Seitennagung entfaltet, daß die Schuttabfuhr vom Gehänge ihr erfolgreich entgegenwirkt.

III. Der Formenablauf bei stetiger, aufsteigender Entwicklung mit Einschaltungen von Zwischenfällen.

1. Vorbemerkung.

In der Schrift: „Die Gipfelflur der Alpen“ hat Albrecht Penck die Hypothese erneuert, eine Hebung könne, ja müsse einmal das Gefälle der Flüsse und dadurch die Erosion so vermehren, daß die Flüsse in den Stand kommen, jener Hebung das Gleichgewicht

¹⁰⁾ Die erosive Tieferlegung ganzer Talsohlen oder die flächenhafte Sohlenerosion konnte ich bisher nur beim Deutschen Geographentag in Leipzig 1921 in meinen Darlegungen zu W. Pencks Vortrag streifen. Als Hypothese auf Grund von Erfahrungen am Murfluß habe ich diese Ansicht im Sommer 1920 in Graz Herrn Prof. Hans Sölich vorgetragen und sodann in meiner Vorlesung, W.-S. 1920/1, unter Hinweis auf talabwärts rückende Määnder bei langsamer Tiefennagung gelehrt. Gesichert wurden meine weiteren im Folgenden gezogenen Schlüsse durch die Arbeit von F. M. Exner: „Zur Theorie der Flußmäänder“. (Sitz.-Ber. d. Ak. d. Wiss., Wien, math.-nat. Kl. Abt. IIa, 128. Bd., 10. Heft, 1919). Darin ist die genaue Abhängigkeit der größten Breite des Bandes von Flußwindungen auch von der Geschwindigkeit erwiesen und rechnerisch soweit quantitativ erfaßt, daß Exner nach Karten die Geschwindigkeiten der Flüsse, der Größenordnung nach, in guten Verhältnissen bestimmen konnte. Die Experimente, die auch abgebildet sind, zeigen, daß eine Zunahme der Geschwindigkeit die Breitenentwicklung, des Määnderbandes noch empfindlicher einschränkt als die Rechnung ergab und zwar wichen die Experimente im selben Sinne wie die Natur ab, weil die Formel der Einfachheit halber die Turbulenz außeracht läßt.

zu halten.¹¹⁾ Diese Hypothese ist außerordentlich anregend und hat so eingeleuchtet, daß man für sie nie einen Beweis verlangte. Sie ist gleichwohl durchaus unbewiesen und zunächst widerlegbar, wo eine parallele Hebung auch nur ein klein wenig rascher erfolgt, als die schnellste vorkommende Abtragung der fluviatilen Wasserscheiden im Durchschnitt längerer Zeiten. An den Wasserscheiden der Ursprünge bestimmen Verwitterung und Schwereabfuhr des Gesteins, wie bald ihr Schutt bis zu den oberen Gerinnestellen gebracht werden kann, nicht aber die Erosion der Gewässer, denen bloß die Weiterfracht überlassen bleibt. Mangelt es an Zufuhr durch Massenabtragung, so kann das Gefälle des Oberlaufs noch so groß sein, der Höhenunterschied zwischen den rückwärtigen Wasserscheiden und dem Unterlauf, wo der Fluß den Rand der steigenden Scholle überschreitet, muß weiter wachsen. Denn auch der Oberlauf wird mitgehoben, sobald seine Gefällsvermehrung nicht mehr von einer ausreichenden Zunahme der Erosionsleistungen begleitet wird oder von gar keiner.

Im Folgenden sei stets der einfache Fall paralleler Hebungen vorausgesetzt, weil mechanisch so manches nicht schlüssig ist, was von „Hebungen“ schlechtweg ausgesagt wird. Übrigens gilt es auch von anderen Hebungen, daß man nicht auf die Herstellung eines Gleichgewichtsgefälles der in der steigenden Scholle entspringenden Flüsse zu rechnen hat. Es ist nun von Wert, der Hypothese A. Pencks die Möglichkeit zuzubilligen, daß ja die Hebung langsamer als manche Grade der Abtragung der rückwärtigen Wasserscheiden erfolgen könnte oder auch mit gleicher Langsamkeit. Unter dieser Annahme kann man dann die allmähliche Entwicklung eines Gebirges mit W. Pencks Voraussetzungen abermals ableiten, mit der Aussicht, daß dann möglichst viel davon unversehrt bleibe. Denn wenn die rückwärtige Wasserscheide wirklich im Gleichgewicht mit der Hebung abgetragen wird und der Fluß im Unterlauf über den Verwerfungsrand fließt, so liegt innerhalb der steigenden Scholle eine Gefällsline, aufgehängt zwischen zwei Punkten, die ihren Höhenunterschied wie ihre Meereshöhen nicht ändern. Selbstverständlich ist deswegen keineswegs die ganze Kurve ein Gleichgewichtsgebilde. Auf keinen Fall hat sie ein dynamisch auf irgendwelche Transportart der festen Stoffe hin definierbares Gleichgewichtsgefälle. Man darf aber sagen, daß ihr Gefälle umso größer sein muß, je größere Massen von den dabei auch steileren Kämmen des Talhintergrundes herabkommen und umgekehrt. Danach richtet sich auch der absolute Betrag des als konstant zugelassenen Höhenunterschiedes zwischen Unterlauf und Ursprung. In Wirklichkeit wird jener nie konstant sein, sondern um mittlere Werte schwanken, ebenso wie das durchschnittliche Gefälle der ganzen Kurve. Im folgenden wird also in diesem Sinne stets von einem mittleren Gleichgewicht die Rede sein. Um alle dabei möglichen Fälle zu erwägen, ist auch ein Blick auf die Verwerfung nötig,

¹¹⁾ Sitz.-Ber. d. preuß. Akad. d. Wissensch. 1919, XVII. S. 264 f.

die den Unterlauf quert und an der die Scholle mit dem ganzen Flußgebiet oberhalb gehoben wird. In einer Zeit, lang genug, daß die Wasserscheiden merkbar abwittern, muß dies auch an der Verwerfungsstufe vor sich gehen, die ja ohnehin zerrüttetes Gestein erzeugt. Unter dem Wasser ist übrigens auch chemische Verwitterung möglich, und zwar längs des ganzen Laufes. Somit bedeutet die Erosion in unserem Falle vor allem die Ausräumung lockerer Stoffe, durch deren Bewegung ihre vorgelockerte Unterlage in Angriff genommen wird. Ins feste Gestein wird dabei nicht eingeschnitten, oder doch nicht wesentlich, ebensowenig wie auf der Wasserscheide unverwitterter Fels zur Abfuhr kommt. Je länger und je wasserreicher ein Fluß ist, bei umso geringerem Gefälle an der Verwerfung kann er ein mittleres Gleichgewicht gegenüber der Abtragung seines Hintergrundes aufrecht erhalten. Hingegen müssen in den Oberläufen, unabhängig von der Gewässerlänge, die Verhältnisse überall die gleichen sein, solange die Hebung in gleicher Weise fortgeht.

2. Der Formenablauf selbst.

Abschnitt a). ¹²⁾

Nehmen wir ein so langsames Steigen der Scholle an, daß der Abtrag chemisch aufbereiteter Verwitterung von sanftesten Hintergehängen des Tales ebenso rasch erfolgt. Dann ist das zur Regelung des Transportes ausreichende Gefälle das geringste, ja ein großer Teil der Arbeit wird von der chemischen Erosion und durch das Fortschaffen des „Schwebs“ oder der Trübe vollzogen. Ein flaches Rindenstück, dessen Hebung so langsam beginnt, hat ein schwaches Relief (ist ein Primärrumpf nach W. Penck). Da jedes kleine Gerinne in so weichem tiefgründigen Boden ein steilwandiges Bett einreißt, so sind die Oberläufe der Gewässer fortwährend von kleinen Einstürzen und Rutschungen bedroht, zu wunderlichen Krümmungen gezwungen; eine Talsohle gibt es da nicht, nur ganz flache Gehänge. Erst mit zunehmender Wassermasse talabwärts können die Flußläufe die ihnen entsprechenden Windungen im Kampfe mit solchen Störungen durchsetzen und eine Talsohle erzeugen. Diese Talsohle wird sich auch, wenngleich mit Schwankungen, gegenüber der Hebung aufrecht erhalten, denn es geht ja alles so langsam, daß sich die Windungen, die Erde und den Feinsand verdrängend, während der Tiefennagung um das nötige Maß talabwärts verschieben. Je kürzer und wasserärmer ein Tal, desto weniger entwickelt ist in ihm ein solcher Unterlauf mit einer Sohle.

Einschaltung 1.

Nehmen wir an, die Hebung würde mit einem Ruck beschleunigt. Als Ruck soll nicht bezeichnet werden ein noch so starkes Schneller-

¹²⁾ Diese Abschnitte haben keinen anderen Grund, als jenen, die Einschaltungen abzugrenzen. Über diese kann man auch hinweglesen.

werden, wenn dessen Endgeschwindigkeit dann gleichförmig wird, sondern nur ein Schnellerwerden, auf das eine rasche Verzögerung eintritt, aber immerhin sei in unserem Falle das Ergebnis, daß die Geschwindigkeit nachher größer ist als vor dem Ruck. Durch dieses Ereignis werden an der Verwerfung schon gröbere Stoffe: Sand und Feinschutt der Verwitterung fortbewegt und auch talaufwärts zeigt sich das in dem Maße, als der Gefällsbruch emporrückt. An seinem Fuße entsteht ein steileres Gefälle, das der nun größeren gleichförmigen Hebungsgeschwindigkeit entspricht und zugleich befähigt ist, eben jene vermehrte Transportarbeit zu leisten. Die Mäander werden eingesenkt und auch der Oberlauf, wo der untere Teil der Gehänge etwas steiler wird. Das rascher fließende Wasser wird dort nicht mehr durch die kleinsten Massenbewegungen aus der Bahn geworfen. Der Gefällsbruch verschmilzt schließlich mit dem Hintergehänge und macht es steiler. Darum kommen dort ebenfalls gröbere Verwitterungsteile in Bewegung, laut Annahme in einem mittleren Gleichgewicht mit der herrschenden Hebungsgeschwindigkeit. Die eingesenkten Mäander, die während ihrer Talvertiefung etwas gestreckt werden,¹³⁾ arbeiten nach ihrem Verschiebungsgesetz sogleich an der Beseitigung der von ihnen erzeugten Sporne, die ja aus sehr gelockertem Gestein bestehen und legen so von unten talaufwärts eine neue Talsohle an. Sie wird schmaler bleiben als die frühere und deren Reste bilden dann Terrassen längs der ganzen so ausgestalteten Laufstrecke.

Abschnitt b).

Betrachten wir die Wirkungen einer ruckfrei erfolgten, geringen Steigerung der Hebungsgeschwindigkeit, also nach gleichmäßiger Beschleunigung. In diesem Fall entstehen durch Tieferlegung der Flußwindungen keine noch so seichten Talwindungen. Sondern die gewundenen Flußläufe erfahren bei wachsendem Gefälle eine allmähliche Streckung, in deren Gefolge sie die Talsohle nur mit abnehmender Breite gegenüber der Hebung aufrecht erhalten können. Daher muß das obere Ende der Sohle sich verkürzen und sie zieht sich talabwärts zurück.¹⁴⁾ Den nicht gewundenen Laufstrecken entsteigen etwas steilere Gehänge wegen des rascheren Einschneidens. Kurze Flüsse am Rande der steigenden Scholle können bei Mangel eines gewundenen Laufes ihr Gefälle nicht mehr durch Laufverkürzung der zunehmenden Hebungsgeschwindigkeit anpassen, sondern es nimmt zu, indem es im Unter-

¹³⁾ Es ist dies eine Folgerung aus der in W. Behrmanns Harzuntersuchung (Forsch. z. Deutschen Landes- u. Volkskunde XX, 2. 3) gut begründeten Erkenntnis, daß eine beschleunigte Tiefennagung, welche Mäander einsenkt, sie auch „streckt“. Vgl. auch die darauf bezüglichen Bestätigungen in dem eingangs erwähnten Aufsatz über Tal- und Flußwindungen. S. 26 d. S. A. sowie den Einklang mit den Ergebnissen F. M. Exners.

¹⁴⁾ Das geschieht zunächst spurlos, insofern ja noch keinerlei merkbare Aufschüttungen vorhanden sind.

lauf am schnellsten wachsend konvex wird bis in die Nähe des Ursprungs.

In allen Fällen, wo die neue Hebungsgeschwindigkeit gleichförmig würde, wäre das Ergebnis wieder die konkave Gefällskurve. Ihr Ansteigen gegen den Ursprung ist ja nur der Ausdruck der abnehmenden Wassermenge und nicht das Anzeichen eines im Vergleich zum Unterlauf vermehrten Erosionsvermögens.

Die vorgeführten Betrachtungen lassen sich nun wiederholen für soweit vergrößerte Hebungsgeschwindigkeiten, daß schon Geschiebe im Fluß den größeren, wenn auch immer noch vorgelockerten Untergrund abnutzen, daß Rutschungen am versteilten Hintergehänge auch schon einzelne Blöcke mitreißen und daß die Flüsse noch ohne Aufenthalt ebensolche am Verwerfungsrande beseitigen. Würde eine Hebung mit so vergrößerter Geschwindigkeit gleichförmig, so müßte das zugelassene mittlere Gleichgewicht noch vorhanden sein. Nur die Annahme eines Ruckes dürfte nicht mehr ohne Vorbehalt eingeschaltet werden, weil sonst dauernd Tiefennagung in den festen Felsen vorkommen könnte, was der Möglichkeit des mittleren Gleichgewichts für die weiteren Entwicklungsstufen der Landschaft ein Ende macht. Es kann aber vorkommen, daß Geröllager im Niederwasser der Flüsse die chemische Zersetzung des Untergrundes hemmen und daher in den Zeiten ihrer erodierenden Bewegung ziemlich frischen Felsen angreifen. Das muß noch nicht das mittlere Gleichgewicht aufheben. Denn die rückwärtigen Wasserscheiden unterliegen dafür ohne Unterlaß dem Angriff der Außenkräfte. Die Talsohlen der Flüsse beschränken sich nur noch auf den Unterlauf und sind schon viel schmaler. Ihr oberes zurückweichendes Ende kann keine Terrassen hinterlassen, wo soeben das Einschneiden sohlenlos wird, denn es ging ja während der ganzen Formentwicklung diesem Wechsel das allmähliche Schmälerwerden der Talsohle voraus, deren Endergebnis das Verschwinden ist. Höchstens Sand und Geröll am flachen Schrumpfungshang mit Abstufungen gelegentlich wirksameren Anpralles verraten die entschwundene Talsohle. Solche Bildungen müssen aber talabwärts ebenfalls vorkommen, wo sie nur bezeugen, daß die noch erhaltene Talsohle umso breiter war, je höher sie lag. Man beachte, daß auch die letzten Strecken einer solchen Talsohle im Unterlaufe als Erbstück aus der Zeit des Primärrumpfes zu gelten haben, stets der schon merklich rascher gewordenen Hebung die Wage haltend.¹⁵⁾ Denn bei dem größer gewordenen Ge-

¹⁵⁾ In Anlehnung an W. Pencks „Primärrumpf“ lassen sie sich als „Primärsohle“ bezeichnen. In dieser Sache selbst bringt aber seine Deduktion keine Klarheit. Aus dem Syllogismus, der bei ihm das sogenannte Gleichgewichtsgefälle mit der schon berührten „partiellen Akkumulation“ verknüpft, kommt allerdings heraus, daß diese Akkumulation talabwärts rückt (a. a. O. S. 96). Die Talsohle aber wird angeblich zu Terrassen zerschnitten, zieht sich also nicht in der hier vorgetragenen Weise zurück. Diese Talsohle, von der a. a. O. S. 97 zum ersten Male zweifellos gesprochen wird, hat ein unaufgeklärtes Verhältnis zur „partiellen Akkumulation“ und auch ihre Herkunft ist dunkel. Denn S. 95 folgert W. Penck, daß frühzeitig die „Windungen“ der Gewässer

fälle schieben sich auch die Windungen rascher zutal als früher; immer noch aber wird das Bett der Flüsse samt festem Inhalt so langsam tiefergelegt, daß diese Geschiebe — gleichzeitig als Seitenhobel angesetzt — nirgends den Ort des Stromstriches im felsigen Untergrund sozusagen feststrammen. Die Täler und Talstrecken ohne Sohlen werden weiterhin mit einem Gehänge eingeschnitten, das im unteren Teil immer weniger flach ist, und sogar mehr geneigt, als das Gehänge über den Ursprüngen. Der Fortschritt der Hebungsgeschwindigkeit bewirkt, daß in allen solchen Tälern ein konvexes Gefälle emporwächst, das nur dann einem konkaven weichen könnte, wenn die Beschleunigung der Hebung von einer gleichförmigen Fortdauer abgelöst würde. Denn dann müßte die Konvexität, weil ohne Zufuhr von unten, mit dem Hintergehänge verschmelzen.

Bisher war während der ganzen ungestört beschleunigten Hebung natürlich keinerlei Gleichgewichtsgefälle, wohl aber ein Zustand vorhanden, der bei einem Gleichförmigwerden des Anstieges der Erdrinde ein mittleres Gleichgewicht herstellen müßte. Die Schwankungen um diese Mittellage werden freilich immer größer, je gröbere Massen zur Abfuhr in Betracht kommen.

Selten verwittert ein Gestein überall gleich rasch und oft nicht gleichartig. Große und kleine Zerfallstücke entstehen dann nebeneinander und in Zwischenfugen bereiten sich feinste Verwitterungsstoffe vor. An der Verwerfung im Unterlauf führt der Niederbruch zeitweilig standhafterer Gesteinsteile zu Rucken der Tieferlegung, klein genug, um als Gefällsunregelmäßigkeiten talauf zu wandern; an der Wasserscheide hat dieselbe Ursache die entsprechende Wirkung. Der ungleichförmige Zerfall des Gesteins bewirkt, daß besonders die kleinen, nicht gewundenen Wasserläufe bei Niederwasser nur die feiner zerteilten Stoffe herausschwemmen und mehr und mehr große Felsstücke bloßlegen, die selbst bei Hochwasser kaum bewegt werden. Das Hochwasser solcher Bäche springt bei fortdauernd vermehrtem konvexem Gefälle über diese Blöcke und kann sie endlich ab und zu mit der unmittelbaren Hilfe der Schwerkraft ein Stück weiterwälzen. Solche Waldbäche mit moosigem Blockwerk durchsetzt, sind selbst bei ganz sanften Gehängen und geringen relativen Höhenunterschieden bekannt. Auch diese Erosion geschieht in großen Rucken. Unterhalb werden bei vermehrter Wassermenge so große Steine selten bedeutungsvoll, da sie mehr vom übrigen Sand und Gerölle abgerieben und leichter beweglich werden.

Im Ursprungsbereiche zieht die Quellerosion — auch die wechselnde der Schuttgerinne — Rutschungen nach sich, die bei erhöhter Böschung ziemlich frisches Gestein entblößen, so daß es nun

„in die steigende Scholle (des Primärrumpfes) einsänken“, wodurch „gewundene Täler“ entstünden. Danach scheint es sich um ein späteres Gebilde als die „Primärsohle“ in dem von mir begründeten Sinne zu handeln. Ein bloßer, noch dazu unstatthafter Syllogismus kann eben keine wirkliche Vorstellung von dieser Entwicklung ersetzen, sei sie auch hypothetisch.

umso länger dauert, bis es für den nächsten derartigen Vorgang aufbereitet ist. Die Ausrißnischen dieser Rutschungen beginnen die Wasserscheide des Hintergehanges in Rucken zu schärfen, früher als an den Seitengehängen der Bachoberläufe, wo eine gesammelte Durchtränkung des Schuttes nicht in gleichem Maße wie in einem Ursprungstrichter geboten wird. Sehr häufig aber wird es vorkommen, daß dicht vor dem Hintergehänge der mindestens unten steilere, weil konvexe Seitenhang im Lauf der Talverdichtung ein entsprechend kräftigeres Gerinne entwickelt. Dies führt dazu, daß das bisherige Hintergehänge örtlich diese Eigenschaft verliert und zum Seitengehänge eines knapp davor umbiegenden Talweges wird, den der neue Bach oben angestückt hat. Die stärkere Böschung, die dann, von weitem gesehen, am Fuße des allgemeinen Hintergehanges des ganzen Tales vermutet wird, ist in der Nähe nur eine seitliche Unterwaschung durch das neue Quellgerinne, das den Talhintergrund in den früheren Seitenhang drängt. Auf solche Art können auch zwei seitliche Quellgerinne entstehen und von den parallelen Haupttälern greifen die längeren, im Grundriß betrachtet, mit einem verbreiterten, manchmal geradezu hammerförmig angesetzten Ursprungsbereiche hinter die Talgebiete der kürzeren. Alle neuen Gräben entstehen bei steilerem Anfangsgefälle als die früheren Quellgerinne und erodieren höher empor in noch lange nicht zugeschärfte Gebirgsteile. Ihre Ursprünge erzeugen daher schon größere Rutschungen im Hintergrunde und ihre Wasserläufe schärfen im Bereich der Haupttalursprünge deren Schlußrücken durch seitliches Unternagen zu, wie eben dargelegt wurde. Dadurch wird die Abtragung beschleunigt und auch die Geschwindigkeit der Hebung kann noch zunehmen, ohne die Möglichkeit eines mittleren Gleichgewichts zu überschreiten, solange die Taldichte zunehmen kann und die Gefälle unter dem Wert bleiben, über dem die Erosionsleistungen nicht mehr weiterwachsen.

Während dieser Entwicklung nähert sich der Zeitpunkt, wo die letzten flächenhaft in die steigende Scholle erodierten Sohlen der größeren Täler im Unterlaufe zusammenschrumpfen und verschwinden. Um diese Zeit sind aber im Bereiche der Wasserscheiden nach allgemeinen Erfahrungen noch Reste der ältesten Rumpflandschaft, in unserem Falle: des Primärrumpfes vorhanden. Bevor nun aber das geringste weitere geschlossen werden kann, besonders über die Schärfe verschmälerter Wasserscheiden und die Verbreitung dieser Formen, ist es nötig, eine Vorstellung zu bekommen von den zu jenem Zeitpunkt vorhandenen steilsten Gehängeböschungen. Wenn die Tiefennagung sohlenlos wird, liegen die steilsten Teile der seitlichen Gehänge am Wasser und bewirken ganz konvexe Rückenformen. Würde die Hebung gleichförmig, so können die ganzen Abhänge höchstens diese von unten emporwachsende Böschung gewinnen, bleibt jene beschleunigt, so ist diese die Ausgangsneigung für steilere Winkel. In jedem Fall ist die gesuchte Größenordnung eines Gehängewinkels jeweils die obere

Grenze für das Anfangsgefälle aller im Verlaufe der Talverdichtung neuentstehenden Gerinne. Als solche ist sie größer als das Gefälle der alten Gerinne am unteren Teil der schon vorhanden gewesenen konkaven Hintergehänge, deren oberer Teil nur der Schauplatz von Rutschungen ist.

Einschaltung 2.

Die Bestimmung dieses Winkels muß davon ausgehen, daß bei der bisher angenommenen beschleunigten Hebung sich niemals Mäander ins feste Gestein einsenken konnten, weil nach Annahme die Erosion dazu nicht rasch genug erfolgte. Die Primärsohle wäre ja durch eingesenkte, zu Talwindungen gewordene Mäander sofort weiterer flächenhafter Erosion entzogen worden. Daraus folgt erstens, daß die in weiten Gegenden der Erde mit bescheidenen Meereshöhen verbreiteten Talmäander auf Grund viel rascherer Erosion entstehen als es jene war, die im beschriebenen Ablauf die ersten Wasserscheidenstücke etwas schärfte und die Primärsohlen durch Schrumpfung beseitigte.

Gewundene Täler setzen also geradezu eine ruckweise Gebirgshebung voraus, mit Geschwindigkeiten, bei denen es nicht zu Gleichgewichtsneigungen welcher Art immer kommen könnte. Es sei hier nur nebenbei darauf hingewiesen, daß aller Wahrscheinlichkeit nach die häufige schöne Asymmetrie der Prall- und Gleithänge einer langsam verzögerten Hebung zugeschrieben werden darf, im Gegensatz zur Streckung, zur Kappung der Sporne und dem Verlassen der Nischenhänge durch den Fluß. Da wir die Größenordnung des Gehängewinkels eines sohlenlos gewordenen V-Tales suchen, braucht man nur noch an zwei Sätze zu erinnern: die Gehänge fallen umso steiler aus, je rascher sohlenlos erodiert wird, und ihre Böschungen stellen ungefähr das arithmetische Mittel der Gleit- und Prallhänge eines ebenso rasch eingeschnittenen Mäandertales dar, wenn dieses nicht ohnehin ziemlich symmetrische Querschnitte hat. Nun gibt es gewundene Täler, deren asymmetrische Abhänge einander mit 10° und 30° gegenüberstehen, so am Main in Unterfranken. Daraus ergibt sich als Mittel 20° und selbst weniger.

Abschnitt c).

Die Größenordnung des gesuchten größten Winkels an den Seitengehängen liegt ganz erheblich unter 20° , auch die konkaven ältesten Hintergehänge können im Durchschnitt diesen Wert auf keinen Fall erreicht haben, die Ausrißstellen der Rutschungen vielleicht ausgenommen, die unter solchen Umständen kaum groß sein können. Dabei ist die erreichte Maximalböschung am kleinsten dort, wo das obere Ende der Primärsohle zuerst zurückweicht, und wird sich, wenn auch von weitem, 20° nähern im Unterlauf, wo die Sohle zuletzt schwindet. Dabei ist immer zunächst von den steilsten Gehängestücken der Landschaft unmittelbar am Wasser die Rede. Man kann sich daher vorstellen, wie große Flächen des Primärrumpfes

da noch im Bereiche der Wasserscheiden erhalten sind. Es wäre geradezu ein Problem, wie bloß durch beschleunigte Erosion scharfe Hintergehänge mit steigender Massenabfuhr entstehen sollten, wenn diese Arbeit nicht von den neuen Gerinnen übernommen werden würde, die sich in die Zwischentalerhebungen einnagen und auch die Rücken der Talhintergründe seitlich unterschneiden. Denn ohne steigende Massenabfuhr wäre die Möglichkeit bedroht, daß die Talbildung noch ins mittlere Gleichgewicht mit der Hebung käme, falls diese gleichförmig würde. Mit anderen Worten: schon zu einer Zeit, wo die Gehänge meist unter 20° steil sind, würde ein allgemeines Ansteigen der Landschaft erfolgen, weil die Abtragung auch an den schmalsten Rücken der Erosion nicht nachkäme. Aber infolge der Talverdichtung tritt dies noch nicht allgemein ein. Freilich, da neben schmalen Rücken noch viele breite Rückenflächen langsamer Abtragung da sind, steigen diese an, während jene ihre Meereshöhe nicht mehr ändern. Die neuen Täler zerschneiden die emporstrebenden Bergmassen weiter und erhalten steilere Seiten- und Hintergehänge früher als die alten Talstrecken. In den neuen Talursprüngen kann sich die Angliederung von Seitengräben mit den oben beschriebenen Folgen wiederholen. Endlich haben viele Wasserscheiden Kammformen und die Meereshöhen der später zerlegten Massen werden mit denen der früher scharf gewordenen Kämme zu einer Gipfelflur zusammengezogen. Dazu war es aber nötig, daß das stets zunehmende Gefälle auch eine zunehmende Last von Gestein abführte, was nicht ohne Einschneiden in dem festen Fels möglich ist. Schon während dieser Entwicklung kann einer solchen Tiefnagung auch die Abtragung der schärfsten Kämme nicht mehr folgen. Schluchten werden eingeschnitten, vielleicht früher als die letzten Reste des Primärrumpfes verschwinden, und die Zeit nähert sich, wo trotz weiterer Steigerung der allgemein konvex zu denkenden Gefälle, die Erosionsleistung nicht mehr zunehmen kann. Klammwände sind die äußersten Böschungen mindestens dort, wo es nicht breite Flüsse und Ströme gibt. Klammwände¹⁶⁾ verschneiden sich nicht miteinander, sondern wintern langsamer zurück als sie in unserem Fall unten verlängert werden, die beschleunigte Hebung hat Geschwindigkeitswerte erreicht, die eine uns unbekannte Massenauftragung emportreiben, aber zu einem oberen Denudationsniveau kann es bei dieser Entwicklung nie kommen. Die Gipfelflur steigt selbst empor.

Ein Sonderfall.

Im Zuge der beschleunigten Hebung muß einmal die Erosionsgeschwindigkeit gleich groß gewesen sein wie die schnellste mögliche Abtragung, welche die schon in erheblicher Zahl zugeschärften Kämme

¹⁶⁾ Alle verfestigten, gebirgsbildenden Gesteine können Klammwände bilden, auch Partnachsichten und der Schweizer Flysch in der Tamina-schlucht. Über die Gründe der besondern Haltbarkeit und über die Weiterentwicklung dieser Wände habe ich Untersuchungen zum Druck angeboten.

erniedrigt. Nehmen wir nun an, die Hebung werde in diesem äußerst erreichbaren Falle eines mittleren Gleichgewichtes gleichförmig. Ebenso wenig wie Rückenformen schon ganz verschwunden sind, ist auch das Schuttkleid der Gehänge großenteils beseitigt, das ja an Böschungen bis über 40° haften kann, wenn die Landschaft einst unter dicker Verwitterungskrume geboren wurde. Damit ist auch der Zunahme der Taldichte eine obere, freilich unbekannte Grenze gesetzt, was die folgenden Ausführungen etwas unsicher macht. Die Reste des Primärrumpfes — wenn überhaupt noch welche da sind — sonst breite Rückenformen, werden noch eine Zeitlang relativ über die scharfen Kämme aufwachsen, weil ihre Abtragung ja langsamer erfolgt. Jene werden von der zunehmenden Taldichte beseitigt, die schmale Rücken schafft und die relativ gewachsenen Höhen sogar absolut herab zieht, wobei ebenfalls eine Gipfflur vorbereitet wird. Aber die Schuttführung der Flüsse muß mit der Vermehrung steiler Böschungen und der Verdichtung des Talnetzes stark zunehmen. Da die Hebung gleichförmig ist, muß sie die Scholle erst wieder relativ ansteigen lassen, damit jene Last in Bewegung bleibe. Ja es kann nicht ausbleiben, daß an Stelle der Rutschungen in den Ursprüngen vieler steilerer neuer Gräben Murbrüche auftreten, deren Massen eine stets beschleunigte Erosion der Flüsse eher mitgenommen hätte. Solche Murbrüche verstopfen mit Wildbachschutt die Vereinigungen kleinerer Gräben und können selbst an der Mündung in sohlenlose Haupttäler Stausohlen bewirken. Sogar das zeitweilige Versiegen der Gewässer in ihnen kommt vor. Der Schutt, der von oben herabgelangt, wird längere Zeit nicht abgeschafft, ja er kann als Halde die Abtragung der Wasserscheiden wieder verlangsamen. So steigen die Meereshöhen wieder, bei Ausbreitung von Flächen lockerer Massen, die erst das größer gewordene Gefälle der Flüsse wieder mitnimmt. Dies wird ohne kräftiges Einschneiden in den Fels nicht mehr möglich sein. Ein solches findet aber am Verwerfungsrande laut Annahme nicht statt und beschränkt sich auf die inneren Teile der Scholle. Dort erzeugt es neue Steilböschungen, Vermehrung der Taldichte, der Schuttlieferung und der zugeschärften Kämme. Eine Gipfflur wird nun ebenfalls erzeugt, z. T. auch durch Emporsteigen der Kämme, von denen die Schuttmassen zeitweise mangelhaft abgeführt werden. Die fortdauernd gleichförmige Hebung kann aber die Verstopfung aller Täler mit Grobschutt nur verzögern. Was die von ihr belebte Erosion von den wachsenden Lasten noch hinaus schaffen kann, umhüllt das Gebirge von außen her. Man sieht: wenn die Hebungsgeschwindigkeit gleichförmig anhält, welche mit dem überhaupt möglichen raschesten Abtrag der zuerst so weit zugeschärften Wasserscheiden im mittleren Gleichgewicht sein kann, so entsteht — durch ungeheure Zeiträume — keineswegs eine Landschaft von gleichbleibenden Eigenschaften, sondern ein langwieriges Auf- und Abwogen der relativen Höhen, hinter dem eine teilweise Abnahme der Meereshöhen nachhinkt, um wieder einer

Zunahme zu weichen. Das Ergebnis ist ebenfalls kein Denudationsniveau im Sinne Albrecht Pencks, sondern zunächst eine selbst in berechneten Landschaften unbekannte Gebirgsgestaltung, die uns nichts weiter angeht. Auch dieser Weg, der hier verfolgt wurde, weil er vielleicht eine Art Denudationsniveau doch abzuleiten erlauben könnte, führte abseits. Die zuerst feinen Schwankungen um eine mittlere Gleichgewichtslage wichen zunehmend groben Ausschlägen, besonders nach der Seite ständigen Wachstums der Meereshöhen.¹⁷⁾ Es ist möglich, daß dieser nicht ins Endlose verfolgte Ablauf zu ruhigerem Schwanken zurückkehrt, die Morphologie der wirklichen Gebirge findet schließlich an ihm keine Vergleichspunkte.

IV. Anmerkungen zur Formentwicklung bei verschiedenen Geschwindigkeiten der Gebirgshebung ohne Verknüpfung mit bestimmten Geschwindigkeiten der Abtragung.

1. Der Lösung harrende Grundfragen.

Wiederum überschreite ein Fluß eine Verwerfung, aber sie hebe die Scholle mit seinem Lauf parallel so rasch empor, daß dabei sofort ins feste Gestein eingeschnitten wird und daß keine Abtragung den Ursprung so rasch erniedrigen kann. Nichts liegt näher, als zu sagen, des Flusses Energie reiche entweder aus, diese Verwerfung während ihres Wachstums einfach zu durchschneiden oder nicht, oder auch, daß er sogar eine rascher wachsende Bruchstufe sogleich zersägen könnte. Und doch liegt darin die Gefahr eines ganzen Rattenschwanzes von Zirkelschlüssen, obgleich hier von einem Punkt des Flußlaufes gesprochen wird und nicht vom Verhalten seiner ganzen Gefällskurve. Bezüglich eines Punktes ist es ja zufällig wirklich richtig und erlaubt, anzunehmen, daß die Verwerfung seine Meereshöhe nicht ändern muß, wenn ein mindestes Maß von Energie vorhanden ist; aber von vornherein könnte man das auch nicht als den mechanischen Gesetzen in allen Fällen entsprechend hinstellen. Bezüglich der Laufstrecke wäre erst zu beweisen, daß sie bestimmte Gefällswerte überall stark genug machen. einer Hebung restlos entgegenzuwirken, bevor man schon vom Falle überschüssiger oder unzureichender Energie als einem möglichen spricht.

Die ausgeglichene Gefällskurve der Flüsse ist transzendent und bisher einer den Geographen befriedigenden mathematischen Behandlung unzugänglich geblieben. Man weiß aber schon, daß diese Kurve eine Konvergenzerscheinung ist; sie stellt sich nämlich ein, ob nun der Unterlauf eine hohe Steilstufe durchsägt oder z. B. an einem Vulkankegel hinabfließt. Wie die potentielle Energie des Flusses, so ist auch die geleistete Arbeit im ersten Fall größer, vorausgesetzt, daß der Ursprung

¹⁷⁾ Es liegt eine Art Selbstverstärkung im Sinne W. Behrmanns vor. (Z. d. Ges. f. Erdk. Berlin 1919, S. 153.)

dabei ebenso hoch über der Erosionsbasis liegt. Denn jene potentielle Energie ist die Summe (das Integral) aller potentiellen Energien aller Wasserteile, die ja ihren Fall im Tale in den verschiedenen Höhen beginnen, in denen sie zum Fluß stoßen. Die lebendige Kraft, die man aus beobachtbaren Werten errechnet, ist nur ein kleiner Rest der potentiellen Gesamtenergie, ein Rest, der an der Talvertiefung noch nicht gearbeitet hat, und der auch nur zum Teil daran arbeiten wird. All das hat Giltigkeit, sowohl für eine langsam ansteigende Bruchstufe als auch für eine ebensolche Schiefstellung. Die potentielle Energie hängt in geradem Verhältnis von der Fallhöhe ab, die wirkliche Geschwindigkeit des Flusses von der Wurzel aus dem Gefälle, als Winkel angesehen. Bei einer parallelen Hebung, deren Verwerfungsrand den Flußunterlauf überschreitet, wird sofort und in gleichem Maße die Fallhöhe aller Wasserteile vermehrt, das Gefälle aber erst nach und nach und zwar in ungleichem Maße. Bei einer Schiefstellung im Sinne der Talrichtung ist es ganz anders. Da wird sofort und in gleichem Maße das Gefälle aller Laufstücke vermehrt, in ungleichem Maße jedoch wird die Fallhöhe der Wasserteile vermehrt, unten gar nicht, am Ursprung am meisten. Obgleich in beiden Fällen die ausgeglichene Kurve sich als Konvergenzerggebnis wieder herausstellt, folgt daraus für die Dynamik des vorangehenden Formenschatzes nicht dasselbe. Die Aufwölbung, ein häufiger Naturfall, stellt oft ein Mittelding zwischen paralleler Hebung und Schiefstellung dar. Unter solchen Umständen ist klar, daß selbst logisch einwandfreie Schlüsse zunächst nur in Anknüpfung an eine bestimmte Art der Hebung brauchbare Ergebnisse liefern können.

Überschreitet ein Fluß auf parallel sich hebender Scholle den Verwerfungsrand, so daß er immer in Gestein gleicher Festigkeit einschneidet, so ist zu fragen: welchen Veränderungen unterliegt dortselbst sein Gefälle, damit er wenigstens manchmal seine Fallhöhe beibehalle, oder mit anderen Worten: wie muß sich dort der Neigungswinkel der Tangente an seine Gefällskurve ändern, damit seine Meereshöhe erhalten bleibe? Auch die umgekehrte Frage ist möglich. Hat man sich diese Fragen gestellt, so kann man sie wieder nur unter bestimmten Annahmen beantworten, nämlich, wie das Gefälle unterhalb der Verwerfung beschaffen sei und ob dort sich das Tal fortsetze oder eine Ebene ausdehne. Davon wird es abhängen, wie die Anschüttung unterhalb der Verwerfung ausfällt, die hier Einfluß hat. Natürlich spielt die Wassermasse eine erste Rolle, besonders für die Art, wie sich die Gefällslinie der Länge nach gestaltet, ob sie konkav bleibt oder konvex wird und wie sich unter Umständen Windungen einstellen, und wie sich etwa eine Laufstrecke zum Unterschied von einer anderen verhält. Ein Ergebnis ist sicher: da der Ursprung in allen Fällen dieser Art mit gehoben wird, so muß bei jeder Wassermasse das Gefälle des Tales und schließlich auch des Flusses zunehmen. Leider konnte ich keine Untersuchung finden, die diese

Fragen für alle geographisch wichtigen Fälle beantwortet, bzw. zur Antwort darauf verhilft. Doch ist dabei schon das Studium eines Lehrbuches wie das von Rudzki: „Physik der Erde“, eine wertvolle Unterstützung, geeignet, vor Irrtümern zu schützen. Aus der transzendenten Natur der Flußkurve ergibt sich, daß sie überhaupt nicht mit einer einfacheren Hebung im Gleichgewicht bleiben könnte, sondern nur mit einer verwickelten, von Tal zu Tal verschiedenen Aufwölbung, wenn das feste Gestein angeschnitten wird. Antezedente Durchbrüche z. B. erfordern schon Aufschüttung oberhalb der aufsteigenden Scholle. Auch hier ist ein Gleichgewicht nie erwiesen worden, sondern es ist mindestens wahrscheinlich, daß die Aufschüttungen den Lauf oberhalb ebenso lange, wenn auch weniger hoch heben, als das Gebirge davor aufsteigt. Es muß gesagt werden, daß diese Fragen rechnerisch wohl größtenteils ungelöst bleiben, bevor man eine brauchbare Gleichung für die Flußkurve findet. Mehr kann da schon die vergleichende Morphologie tun und große Experimente, wie sie in Flußbaulaboratorien möglich sind. Diese Betrachtungen haben ihren Zweck erfüllt, wenn sie bewirken, daß veraltete und nur bequeme Denk- und Redeweisen wehr und mehr beiseite gelassen werden.

2. Über die Entstehung von Talterassen.

Ohne alle mathematische Betrachtung kann hier gleich der Talterassen gedacht werden, die man so zu erklären pflegt, daß Stillstände der Erdrinde mit Seitennagung eine Reihe von Hebungen unterbrochen haben. Dies bringt bekanntlich mancherlei Härten mit sich. Es erfordert, daß diese ohnehin seltsamen Stillstände von abnehmender Dauer seien oder Flüsse vorfinden mit jedesmal verminderter Leistungsfähigkeit in der Seitennagung, so daß jede sohlenlos eingeschnittene Talvertiefung eine Sohle erlangt, weniger breit als die frühere war. Diese Schlußfolgerung ist aber durchaus hypothetisch, indem sie stillschweigend eine unbewegte Erdrinde als die einzige Voraussetzung für die Anlage breiter Sohlen ansieht. Nicht im geringsten aber steht ihr oft eine Deutung nach, welche die älteren Terrassen als Formen ins Auge faßt, die beim Schmälerwerden einer flächenhaft in die Tiefe erodierten Talsohle entstehen. Dies geschieht bei geröll- und sandbedeckten Sohlen, wie oben gefunden wurde, im Falle beschleunigter Hebung. Wird diese mit der erreichten höheren Geschwindigkeit gleichförmig, so wird die Talsohle im mittleren Gleichgewicht mit der Hebung ohne Breitenverlust eingengagt. Dabei wird durch die Seitennagung des Flusses und die gleichzeitige Verwitterung der Gehänge der Hang über bzw. unter den Terrassen erzeugt. Die Terrassen sind dann eigentlich nicht alte Talsohlen, sondern sie sind die von Haus aus schrägen Schrumpfflächen, an denen die seitlichen Ränder solcher Sohlen und damit die Linie der Unterwaschung sich gegen die Talmitte und zugleich in geringere Höhen zurückzogen. Daß Gehänge

umso steiler ausfallen, je rascher die Tiefennagung ist, gilt nur für sohlenlose Erosion; die flächenhafte während der Hangbildung geschah immer rascher als zur Zeit der Terrassenbildung in größerer Höhe und langsamer als jene, welche die Terrassen darunter schuf. Solche Terrassen sind also das Zeichen, daß eine allmähliche Hebung in einem Zuge, aber mit Zeiten der Beschleunigung stattgefunden habe. Diese kann auch solche Geschwindigkeiten hervorrufen, daß das Tal zu unterst sohlenlos, durch Versenkung seiner Windungen bei deren Streckung, bis zur Gegenwart weiter erodiert wird.

Immerhin gibt es zwischen manchen Terrassen so steile Hangstücke, daß man selbst bei Heranziehung der Seitennagung zweifeln wird, ob diese Stücke das Werk einer immerhin so allmählich bleibenden Tiefennagung mit flächenhafter Sohlenversenkung sein können. Es sollte ja die neue Hypothese nicht als die einzig richtige empfohlen werden. Was aber das eben genannte Bedenken betrifft, so muß man nicht gerade an talabwärts wandernde Flußmäander bei der Aufrechterhaltung der Sohlen denken. Auch jede Verwilderung auf einer Schottersohle ist dazu im Stande und könnte durch Angriff auf das feste Gestein bei der Erosion sogar einer rascheren Hebung ein mittleres Gleichgewicht halten. Schotterzufuhr von einem stark steigenden Oberlauf und eine reichliche Geröllerschaft aus der Zeit größerer Sohlenbreite schaffen dafür nicht ungünstige Voraussetzungen. Es lassen sich auch Mischfälle denken, vor denen teilweise beide, die alte und die neue Arbeitshypothese, verwertet werden können. Werden nämlich Flußmäander einer breiten Sohle als Talwindungen ins feste Gestein eingesenkt und wird dann eine neue Sohle gebildet, die gegen die Hebung aufrechterhalten wird, während die Mäander die Sporne beseitigen, so war die Geschwindigkeit der Erosion beim Einsinken der Mäander viel größer als bei dieser Sohlenbildung. Eine neue aber genügend langsame Beschleunigung der Hebung erzeugt aber einen flachen Schrumpfgang, nach der hier vorgebrachten Hypothese, der zur Terrasse wird, wenn darunter wieder ein weniger flacher Hang folgt. Es ist übrigens unwahrscheinlich, daß die Formen eines gewundenen Tales gewöhnlich spurlos aus der Gehängegestaltung verschwinden.

Obwohl die vorgebrachte neue Arbeitshypothese bei der Deutung der Terrassen von vornherein in keinem Punkte weniger wahrscheinlich ist, als die bisherige Erklärung durch Stillstände, ist sie nicht dazu gemacht, daß man sie ebenso unkritisch anwende. Es gibt aber Fälle terrasserter Gehänge, wo sich die Erklärung der flachen Gehängestreifen durch zeitweise beschleunigte Talvertiefung überlegen erweist. Dies gilt z. B., wenn die Hänge zwischen den Terrassen keinerlei Gegensatz von Nischenhängen und Spornen aufweisen und wenn die höheren Terrassen selbst bei geringer Breite (senkrecht zur Talrichtung gemessen) flacher geneigt und daher scheinbar weniger umgewandelt sind als die tieferen und später erzeugten. Wo solche Um-

stände zutreffen, schließen sie es eigentlich aus, die ohnehin mit Härten belastete alte Hypothese anzuwenden.

Die bisherigen talgeschichtlichen Untersuchungen auf Grund von Terrassen bedürfen darum alle einer Überprüfung der mechanischen Begründung, wo eine solche versucht wurde, wo aber Parallelisierungen von Formengruppen (Terrassen, „Niveaux“ usw.) nach äußeren Merkmalen allein geboten werden ohne solche Begründung, hängt alles davon ab, wie klar und eindringlich die Beschreibung ist, und ob die Natur es erlaubte, ohne viele Hilfsypothesen auszukommen. Solche werden nötig, wenn eine Terrasse auf einer Talseite ganz aussetzt oder wenn ihre beiderseitigen Höhen nicht übereinstimmen. Alle derartigen Hilfsypothesen, die nur mit der alten Deutung der Terrassen stehen, würden auch mit ihr fallen.

Die Hebungen der Erdrinde erfolgen ja nie parallel zur Ausgangslage, sondern mit mancher Schiefstellung und Verbiegung, von weiterem ganz abgesehen. Das kann die wechselvollsten Einflüsse auf die Höhe der Terrassen, ihren Längsverlauf, ihre Zusammengehörigkeit und ihr Fehlen auf einer oder der anderen Talseite haben. Die neue Erklärung erleichtert da die Gruppierung, ohne daß jede Annahme gleich den Eindruck einer Verlegenheitshypothese macht. Vieles erscheint möglich und muß nicht in eine Reihe ruckweiser Stillstände eingegliedert werden. Das Mögliche kann eher als bisher einleuchtend gemacht werden, dafür rückt die strenge Beweisführung vielleicht in größere Ferne, denn nunmehr ist höchster wissenschaftlicher Anforderung nur noch durch sorgfältige Bewegungsnachweise im ganzen Formenschatz und nicht bloß an den Terrassen gedient. Dies gilt vom Bereiche der Gipfelhöhen ebenso wie von den Längsschnitten der Flüsse und Täler. Erst der streng mechanische Zusammenhang einer Gesamtdeutung kann oft näher liegende Einzelerklärungen entkräften oder beweisen.

V. Schluß.

Alles bisher Betrachtete hatte nur das Höherwerden eines Gebirges, das Tieferwerden der Täler, oder wie W. Penck es nennt, die aufsteigende Entwicklung im Auge. Wie immer sich diese gestaltet hat, so treten in der absteigenden viele gemeinsame Züge auf, die sich nur durch den Punkt der Annäherung an den zwar umbaubedürftigen, aber auch umbaufähigen und unentbehrlichen Zyklus von Davis unterscheiden. Wo es keine Talsohlen mehr gegeben hat, aber genug Wasser ist, entstehen neue, die von unten talaufwärts ins Gebirge wachsen. Die Gehänge werden unterschritten, und so einfachere, schräge Talgehänge zerstört und mindestens konvex gemacht. Dagegen können schon vor der Sohlenbildung die Felswände von Schluchten eine Konkavität erlangen.¹⁹⁾ Wo aber die Gewässer zu kümmerlich sind, um Sohlen aufzuschütten, werden höchstwahrscheinlich

¹⁹⁾ Hiefür werde ich hoffentlich bald die Beweise vorlegen können.

Muldenformen entstehen, d. h. der untere Gehängeteil wird konkav, an Stelle der konvexen Böschung in der aufsteigenden Entwicklung. Wenn die Sohlen der Flußtäler schließlich ihre größte Breite erlangt haben, wird der beiderseitige Gehängefuß infolge Schutzzufuhr wohl überall durch konkave Linienzüge im Talquerschnitt ersetzt. Ungeklärt ist noch die Frage, ob und in welchem Maße die Taldichte auch noch in der absteigenden Entwicklung zunehmen kann. Alles andere, das vorgebracht wurde, erlaubt folgende

Zusammenfassung.

Die Beschreibung der Landformen kann sich mit Erfolg nur an gesetzmäßig ableitbare Musterformen anlehnen. Wegen ihrer Einfachheit eignen sich zur Aufstellung solcher Musterformen zwei Annahmen am besten, die im strengsten Sinne in der Natur wohl nie oder nur ganz kurzfristig verwirklicht sind, soweit ein Relief auf Grund von Rindenbewegungen in Betracht kommt.

Die eine Annahme setzt den Fall, daß tektonische Ausgangsformen rasch unversehrt zur Ruhe gelangen können, um dann alle Stadien der Zerstörung und Verhüllung zu durchlaufen. Die andere Annahme hat den richtigen Grundgedanken, daß bei bewegter Rinde die Bodenformen sich so langsam ändern können, daß man fast von einem Gleichgewicht sprechen darf. Dieses kann zeitweise sogar verwirklicht werden, wenn eine Hebungsgeschwindigkeit die entsprechende Abnahme erfährt. Auf den beiden Säulen ruht der ganze Weiterbau der Geomorphologie zur Gesetzeswissenschaft. Den ersten Fall hat W. M. Davis zur Grundlage einer systematischen Reihe von Musterformen gemacht. Der andere ist seit jeher von A. Penck ins Auge gefaßt worden, doch fehlte bisher eine systematische Deduktion, trotz dem Vorbilde Davis'.

Diese Lücke durch den Entwurf eines entsprechenden Formenzyklus auszufüllen hat W. Penck versucht. Er ging aus von langsamen Krustenbewegungen, die sich beschleunigen, bis scharfe Kämme zur Herrschaft gekommen sind, und er wies auch noch auf etliche morphologische Folgen einer ebenso langsam — bis zum Stillstand — verzögerten Rindenbewegung hin. Ein wesentlich abweichender Versuch dieser Art wurde hier u. zw. für den Fall paralleler Hebung vorgelegt. Es ergab sich daraus, daß die flächenhafte Tieferlegung ganzer Talsohlen, bzw. deren Aufrechterhaltung bei entsprechend langsamer Hebung als eine morphologische Theorie begründet werden kann. Diese Talsohlen werden bei zunehmend rascher Hebung des „Primärrumpfes“ infolge Streckung der Flußwindungen schmaler und ziehen sich darum gegen den Unterlauf der größeren Flüsse zurück. Wo die Sohlen eben verschwinden, haben selbst die steilsten Teile der konvexen Gehänge noch weit unter 20° Neigung. Die um diese Zeit durch Rutschungen erst eingeleitete Zuschärfung der rückwärtigen Wasserscheiden wechselt oft ihren Hauptschauplatz infolge der Neuanlage

von Nebengräben an den Seitengehängen. Dicht vor den Talhintergründen bewirken diese neuen seitlichen Wasserläufe, daß die zuerst nur schwach zugeschärften ältesten Hauptwasserscheiden wenigstens streckenweise zu Zwischentalkämmen von Ursprungsgräben werden, die jenseits und diesseits dazu parrallel verlaufen. Bei fortschreitender Hebungsgeschwindigkeit werden schließlich auch die letzten breiten Rücken vernichtet und die Kämme zu einer Gipfelflur zusammengezogen. Diese steigt langsamer an als die Rinde, aber ein oberes Denudationsniveau gibt es nicht. Dies würde ein Gleichgewicht zwischen Innen- und Außenkräften für lange Frist erfordern auf Grund eines bei paralleler Hebung nicht möglichen dynamischen Gleichgewichtsprofils der Flüsse. Es gibt auch nicht die von W. Penck abgeleiteten Gleichgewichtsreliefs ganzer Gebirge. Wenn die Hebung weiter beschleunigt wird, zerschneiden Schluchten und Klammen die immer ungefügere Gebirgsmasse. Nur bei gleichförmigen Geschwindigkeiten, die unter der Grenze jener liegen, mit der Grobschutt von den Hintergehängen abgewittert wird, kann eine Formenwelt im ganzen aber nicht im einzelnen in einem „mittleren“ Zustand erhalten bleiben.

Eingesenkte Mäander und fluviatile Hochgebirgsformen bilden sich nur bei solchen Hebungsgeschwindigkeiten aus, bei denen die Scholle und das Relief viel rascher emporwachsen als bei der flächenhaften Sohlenerosion. Die Theorie dieser Sohlenerosion erlaubte, eine neue Erklärung für die Talterrassen aufzustellen. Danach können diese auch Schrumpfflächen sein, an denen sich bei beschleunigter Hebung der Rand der Geröllsohle gegen die Talmitte zurückzieht, während sie zugleich tiefer gelegt wird. Die hier vorgeführte Ableitung eines stetigen Zyklus bei bewegter Rinde will nicht besagen, daß im Verlaufe einer Gebirgsbildung gar keine Diskontinuitäten morphologischer Art (Rucke der Entwicklung) vorkommen; im Gegenteil. Ebenso wenig soll dadurch wahrscheinlich gemacht werden, daß die auf allen Hochgebirgsscheiteln vorkommenden Reste von Rumpfflächen lauter „Primärrümpfe“ im Sinne W. Pencks sind. Für die Alpen sind verschiedentlich Endrumpfe anzunehmen.

Die Bedeutung der Geomorphologie für Geländeaufnahme und Geländedarstellung.

Von Dr. Hermann Leiter.

Die Mannigfaltigkeit der Formen der Landoberfläche wurde wohl schon früh erkannt und fand in gewissem Grade schon Berücksichtigung bei der älteren Geländeaufnahme und Geländedarstellung. Die Erfassung des Geländes in dieser Hinsicht basierte bei den ausübenden zunächst meist militärischen Topographen und Kartographen auf den sogenannten Terrainlehren (I. K. Etzel 1850, Zybulz 1861,

Wanka 1870, Pühoda 1872, Zaffauk 1875, Streffleur 1878, Reitzner 1878/93). Es dürfte in Fachkreisen zu wenig bekannt und gewürdigt sein, daß einige dieser Terrainlehren (und auch einige Schweizer) und insbesondere ältere, schon zahlreiche geomorphologische Anregungen enthalten und auf den Zusammenhang der äußeren Geländeform mit dem inneren Bau hinweisen.

Diese geomorphologischen Anregungen sind leider z. T. in Vergessenheit geraten und so blieb es bei der Geländedarstellung und -Aufnahme bei einem gewissen Schematisieren der Landschaft, des Geländes und manche gerade wesentliche Detailformen wurden unterdrückt, bis die systematische, geologische und geomorphologische Durchforschung auch der Gelände erfassung für den Topographen neue Wege weisen mußte.

Durch die genaue geologische und geomorphologische Durchforschung wurde den Geländeformen, insbesondere auch deren Detailformen, die gebührende Charakterisierung, Beschreibung und Darstellung zu Teil. Die alten Terrainlehren hatten zwar in den aller allgemeinsten Zügen den durch geologischen Bau und geomorphologische Entwicklung bedingten Geländeverschiedenheiten einigermaßen auch Rechnung getragen, aber sie konnten namentlich noch nicht die Erfahrungen über die Gesetzwierigkeiten und damit über die Verbreitung und Ausdehnung gewisser Geländeverschiedenheiten sich zunutze machen, welche Erfahrungen ja vor allem erst durch die genaue geologische und geomorphologische Forschung und Beobachtung erzielt werden.

Da genaue geologische und geomorphologische Forschung z. B. in den Alpen erst spät einsetzte, zur Zeit als die erste Geländeaufnahme bereits fertiggestellt war, letztere sozusagen einen Vorsprung vor ersterer hatte, so war es selbstverständlich, daß den späteren Geländeaufnahmen und Geländedarstellungen viel nachzuholen übrig blieb, um das Kartenbild durch Verbreitung der geologischen und geomorphologischen Erkenntnisse und Erfahrungen zu verfeinern. Ja durch die fortschreitenden geologischen und geomorphologischen Erkenntnisse wurden die Ansprüche an die Karte geradezu gesteigert.

Nur wenige Beispiele sollen die Bedeutung geologischer und geomorphologischer Erkenntnisse für die richtige Gelände erfassung beleuchten. Immer wieder begegnet uns im Gebirge besonders bei größerer Gesteinsdifferenzierung, daß die Geländeformen, und zwar insbesondere die Detailformen, in strenger Abhängigkeit zur Gesteinsbeschaffenheit stehen. Die Berg- und Talformen, auch in den Details, im massigen Kalk sind ganz andere als im Dolomit oder gar in den Sandsteinen und Schiefen. Diese Abhängigkeit vom Gestein ist geradezu so groß, daß der geübte und erfahrene Geologe und Morphologe schon auf Grund der geomorphologischen Beschaffenheit auf das charakterisierende Gestein zu schließen imstande ist und der

Feldgeologe sich mit Recht dieses Kriteriums bei der Ziehung von geologischen Grenzlinien bedient. Man beachte insbesondere auch die verschiedene Morphologie der Felswände je nach der Gesteinsbeschaffenheit, Härte, Durchlässigkeit, Bankung und Schichtung, Klüftung, usw. Die Ausbildung der Bänder an steilen Gehängen (z. T. die sog. „Denudationsterrassen“) hängt vom Ausscheiden der weicheren Schichten ab, während umgekehrt die Schichtköpfe harten Gesteins Stufenbildungen an den Gehängen verursachen.

Sind gewisse Geländeunterschiede erzeugt durch den geologischen Bau, so gibt auch die geomorphologische Forschung eines Gebietes Fingerzeige, z. B. für das Nebeneinanderauftreten von Formen verschiedener Entwicklungsstadien (nach Erosion und Abtragung), wo etwa bei sonstiger Gesteinsgleichheit oder -ähnlichkeit flache abgeböschte Formenelemente an weniger abgeböschten, steileren — hinsichtlich des sogenannten geographischen Zyklus also ältere Formen an jüngeren — abgrenzen. Abgeflachte wellige Rumpfflächen z. B. heben sich in Rändern ab gegen jüngere Schluchten, alte Talböden verursachen Terrassenreste, deren Ränder (Leisten) gegen die tieferen Talformen sich absetzen. Die Kenntnis der die Erdoberfläche gestaltenden sogenannten „exogenen“ Kräfte, das Studiengebiet der allgemeinen Geologie und Geomorphologie, erleichtert es ungemein, das Wesentliche der Geländeformen zu erkennen (z. B. Wildbäche, Bergstürze, heutige und eiszeitliche Gletschertätigkeit). Besonders die Darstellung der Hochgebirgsformen (Felswände) verlangt eine diesbezügliche scharfe Beobachtung und ein Erkennen der wesentlichen geomorphologischen Vorgänge und Prozesse.

Geologische und Geomorphologische Forschung vereint sind geeignet, eine Unzahl von Gesetzmäßigkeiten und Charakterisierungen der Geländeformen aufzudecken, die dem wenig oder gar nicht geschulten Topographen entgehen und daher nur verschleiert auf der Karte wiedergegeben werden. Dagegen erschließen sich dem geschulten, morphologisch beobachtenden Topographen die Einzelheiten, Wesentlichkeiten und Zusammenhänge der Geländeformen durch die morphologische Betrachtungsweise. Die Beobachtung wird eine schärfere, wenn der Topograph eine geologisch-geomorphologische Schulung mit sich bringt, bzw. wo er zumindest mit den allgemeinen Zügen der geologischen und geomorphologischen Gestaltung seines Terrainabschnittes vertraut gemacht ist.

In sehr berechtigter Würdigung dieser Bedeutung der Geologie und Geomorphologie für die Erfassung des Geländes bei der Aufnahme, Darstellung und Kartenzeichnung ging schon 1920 vom Oberst Karl Popp, dem Leiter der Mappierungsgruppe des ehemaligen militär-geographischen Instituts, jetzt Bundesvermessungsamtes, die Anregung und Initiative aus, für die Topographen und Kartographen dieses Instituts geomorphologische Kurse in die Wege zu leiten und es unternahm der Geomorpholog und Geolog Dr. Gustav

Göttinger (Geologische Bundesanstalt Wien) die Leitung dieser Kurse, welche in den folgenden Jahren fortgeführt wurden und eine ständige Institution im Bundesvermessungsamt werden sollen. Es erwies sich als ersprießlich, jeweils das in der Sommerkampagne aufzunehmende Terrain einer speziellen geologisch-geomorphologischen Erörterung zu unterziehen. Neben dieser speziellen Behandlung des Stoffes mußten natürlich auch allgemeiner in die Geomorphologie einführende Vorträge gehalten werden. Zur Unterstützung des dort Gelehrten und insbesondere, um die Topographen im Gelände geomorphologisch zu schulen, veranstaltete Dr. Göttinger geomorphologische Exkursionen in der Umgebung von Wien.

Entsprechend den beabsichtigten Geländeaufnahmen wurden behandelt 1920/21 die geomorphologischen Verhältnisse des Mühlviertels und des Salzkammergutes, 1922 die Morphologie des Tennen- und Hagengebirges samt den nördlich angrenzenden Kalkalpen. Exkursionen fanden statt zur Erläuterung der geomorphologischen Verhältnisse des Wienerwaldes, wobei den unterschiedlichen Detailformen der Flyschzone und der Kalkzone die Aufmerksamkeit zugewendet wurde.

Der Kurs war besucht sowohl von den Topographen des Bundesvermessungsamtes als auch von den Kartographen des kartographischen Institutes (früher Militär-geograph. Institut, Gebäude B).

Da die Notwendigkeit einer geomorphologischen Schulung durch Kurse und Exkursion erkannt wurde, wäre es zu begrüßen, wenn dieser geomorphologische Kurs, der zunächst mehr einführenden Charakter besitzen mußte, entsprechend erweitert, zu einer ständigen Einrichtung für die Topographen und deren Nachwuchs ausgestaltet würde.

Durch die infolge des neu inaugurierten Kurses eingeleitete stärkere Berücksichtigung der Geomorphologie bei der Terrinaufnahme und Terraindarstellung erscheint demnach der seit den alten Terrainlehren, welche, wie erwähnt, für die damalige Zeit sehr beherzigenswerte geomorphologische Anregungen brachten, wieder abgerissene Faden der Anlehnung der Geländeaufnahme an die Geomorphologie neu aufgenommen. Möge das gemeinsame Schaffen von Geologie, Geomorphologie, Topo- und Kartographie die schönsten Früchte zeitigen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 1922

Band/Volume: [65](#)

Autor(en)/Author(s): Lehmann Otto

Artikel/Article: [Beiträge zur gesetzmäßigen Erfassung des Formenablaufs bei ständig bewegter Erdrinde und fließendem Wasser. 55-81](#)