

# Strittige Fragen der Glazialmorphologie.

Von

**Eduard Wolfgang Burger, Wien.**

Der Dreiklang Stufe—Trog—Kar schafft die Eigenart des hochalpinen Formenschatzes. Schon frühzeitig erkannte man den Zusammenhang dieser Formen mit den Gebieten ehemaliger oder noch andauernder Vergletscherung (Le Blanc 1842); in welcher Weise freilich das Eis an der Formenprägung beteiligt war, darüber gingen die Meinungen von vornherein auseinander: glaziale Schutzwirkung, Erhaltung vorher entwickelter fluviatiler Formen nach Ansicht der einen, Fähigkeit des Eises, das voreiszeitliche Relief in mehr minder nachdrücklicher Weise umzugestalten, dies glaubten die anderen. Heim und Penck waren die Hauptvertreter der gegnerischen Meinungen.

Die Entwicklung der Glazialmorphologie in den letzten Jahrzehnten hat eine Annäherung zwischen den extremen Anschauungen gebracht. Man erkannte, daß Erscheinungen, die der rein glazialen Erklärung Schwierigkeiten bereiten, verständlich werden, sobald fluviatile Mitwirkung in Betracht gezogen wird; Aussprüche wie „eisüberformtes Flußwerk“ (Sölch), „glaziale Ornamentik, nicht Architektur“ (Klebensberg) wurden zum geflügelten Wort.

Fast möchte mir scheinen, daß die Annäherung an die Auffassung der Schweizer Schule in manchem Belange, den eigentlichen Ausgangspunkt — eben die Eigenart der Glaziallandschaft — vergessend, schon zu weit gegangen ist. Doch ist es nicht Zweck dieser Arbeit, eine bibliographische Übersicht zu geben — dies verbietet die Knappheit des verfügbaren Raumes und erübrigt sich auch angesichts der großen Zahl zusammenfassender Darstellungen —, sie will vielmehr nur einzelne kritische Punkte beleuchten und durch zum Teil neue Gedankengänge<sup>1)</sup> der Forschung im Gelände Anregung geben. Die hier folgenden Ansichten stützen sich auf die Kenntnis großer Teile der Ostalpen, sowie insbesondere auf eingehende Untersuchungen in den Ötztaler Alpen. Sie können daher zunächst nur regionale Gültigkeit beanspruchen, doch scheint eine Verallgemeinerung in vielem durchaus erlaubt.

## I. Die Talstufen.

Vom Standpunkt der reinen Glazialtheorie, als deren Grundwerk „Die Alpen im Eiszeitalter“ gelten kann, bezeichnen die Talstufen im Anstehenden,

<sup>1)</sup> Sie wurden zu einem Teil bereits in der im Frühjahr 1931 am Geographischen Institut der Universität Wien fertiggestellten Dissertation des Verfassers über die Morphologie des Ötztals dargelegt.

soweit sie nicht bruch- oder gesteinsbedingt sind, Stellen plötzlich geänderter Erosionsleistung infolge Konfluenz- (bzw. Diffluenz-)Wirkung. Die Beobachtung im Gelände ergab jedoch, daß zahlreiche Stufen mangels irgendwelcher Konfluenzwirkung nicht dieser Entstehung sein können; umgekehrt ist es häufig genug an Stellen offenkundiger Konfluenz nicht zur Stufenbildung gekommen. Diese Unstimmigkeiten müssen davor warnen, die Bedeutung der Konfluenz für die Stufenbildung und Stufenerklärung zu überschätzen. Zur gleichen Zurückhaltung führt folgende Überlegung: Die Erscheinung der Stufenmündungen, die in allen Fällen, wo der Talboden der Hängetäler in sehr verschiedener Höhe gelegen ist (vgl. 1) — und dies ist in den Alpen geradezu der normale Fall — oder wo breite Talböden oder Talbodenreste im Haupttale unter dem Niveau der Stufenmündungen mit solchen zugleich auftreten — was ebenfalls sehr häufig zu beobachten ist —, nur bei glazialer Mitwirkung befriedigend erklärt werden kann, zeigt die Ohnmacht der Seitentalgletscher, gemessen an der Erosionsleistung des Haupttalgletschers; sollten nun diese Seitentalgletscher, die ihr eigenes Bett nur unzureichend eintiefen konnten, den Eisstrom im viel breiteren Haupttale so wirksam verstärkt haben, daß oft viele 100 m hohe Stufen entstehen konnten? Nein, man wird vielmehr nur niedrige Stufen lediglich durch Vereinigungswirkung erklären können. Lehmann (2, S. 21) gibt als oberen Grenzwert für die Höhe reiner Konfluenzstufen im Adamello 70 m an. Dieser Wert hat natürlich nur lokale Gültigkeit; allgemeinesprochen, ist die Höhe der Konfluenzstufen einleuchtenderweise eine Funktion der absoluten Größe der Schürfkraft der Gletscher und zugleich des Verhältnisses der Schürfkraft des einmündenden Gletschers zu der des Hauptgletschers. Stellt man die Schürfkraft des Hauptgletschers durch die Länge ( $l$ ) und die Schürfkraft des einmündenden Gletschers durch die Breite ( $b$ ) eines Rechteckes dar, so ist die Schmalheit des Rechteckes ein sinnfälliger Ausdruck für die zu erwartende Höhe der Mündungsstufe, bzw. Niedrigkeit der Konfluenzstufe. Wird  $l$  gleich  $b$  und damit das Rechteck zum Quadrat, so ist jener Grenzfall gegeben, wo die Mündungsstufe mit der Konfluenzstufe zu identifizieren ist, wo die Höhe dieser ihren größten, die Höhe jener ihren kleinsten Wert erreicht.

Angesichts der beschränkten Möglichkeit der Stufenerklärung durch Konfluenzwirkung bleibt der induktiven Stufenforschung als ultima ratio die Annahme, eine Großzahl von Stufen sei bereits vor- oder zwischeneiszeitlich fluvial angelegt worden.<sup>2)</sup> Damit ist eine bedeutsame Brücke zur Auffassung der Schweizer Schule geschlagen. Von Seiten jener, die auf dem Standpunkt der Glazialerosion stehen, müssen de Martonne und Sölch als Vorkämpfer für diese Stufenerklärung genannt werden.

<sup>2)</sup> Einige wahllos herausgegriffene Beispiele: Stufe im Finstertal bei Kühtai von 2100 auf 2250, vgl. Karte d. D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai Bl. II. — Stufe im Tumpental von 2150 auf 2300, vgl. Karte d. D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai Bl. I. — Stufe im Pollestal von 2150 auf 2275, vgl. Karte d. D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai Bl. I u. II. — Stufe im Timmeltal von 2450 auf 2550, vgl. Karte d. D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai Bl. IV. (Karte unrichtig.) — Stufe im Gradental von 1700 auf 1900, vgl. neue österr. Sp.-K. 1 : 50.000 Bl. Lienz. — Stufe im Gößnitztal von 1900 auf 2100, vgl. neue österr. Sp.-K. 1 : 50.000 Bl. Lienz. — Stufe im Samertal etwa von 1700 auf 1900 (Pfeis), vgl. Karwendelkarte d. D. Ö. A. V.

Auch auf deduktivem Wege läßt sich das Vorhandensein fluviatiler, also Rückschreitstufen erschließen: seit Rütimeyers Arbeit (3), besonders aber in neuerer Zeit haben morphologische Einzeluntersuchungen immer wieder das Bestehen mehrerer Talstockwerke erwiesen. Für das Verhältnis der Elemente der einzelnen Stockwerke zueinander sind aber nur zwei Möglichkeiten denkbar: 1. Das tiefere Stockwerk leitet in die Elemente des höheren allmählich über. In diesem Falle müßte sich an Hand der Terrassen der Nachweis hierfür erbringen lassen, was unseres Wissens kaum noch geschehen ist. Oder 2. Ebenso wie am Gehänge ist das tiefere Stockwerk auch im Talweg durch eine Gefällsteile von den Elementen des höheren Stockwerkes getrennt. Da aber die Ineinanderschachtelung mehrerer Stockwerke, wie übereinstimmend angenommen, ihre Ursache in der Neubelebung der fluviatilen Erosion hat, muß jene Gefällsteile, als Endpunkt der neuerweckten fluviatilen Erosion, notwendig auch fluviatiler Anlage sein. Für die Trogschlußstufen ist die Entstehung als Rückschreitstufen heute schon allgemein anerkannt, begreiflicherweise, denn die Trogschlußstufen zeigen deutlichst zwei für Rückschreitstufen bezeichnende Merkmale: der Stufentritt (Trogplatte) setzt sich zu Seiten des tieferen Stockwerkes in Terrassen (Schulterflächen) fort und der Stufenabfall trennt zwei Talabschnitte verschiedenen Allgemeinprägunges.

Zugleich zeigen die Trogschlußstufen aufs klarste, daß die fluviatil angelegten Stufen erst unter der Mitwirkung des Eises ihr heutiges, oft mauer gleiches Aussehen erlangt haben können; denn mit vollem Recht betont Brückner (4, II, S. 622) den Formenunterschied zwischen fluviatilen und glazial gestalteten Stufen.

Wenn ein Teil der Stufen also glazial umgeformte, fluviatil angelegte Gefällstörungen sind, so erhebt sich die theoretische Frage: wie konnten diese erhalten bleiben, in welcher Weise vollzog sich ihre Umformung? Um die Klarstellung dieser Frage haben sich insbesondere de Martonne (1909) und Burchard (1923) bemüht.

Zum Verständnis der Stufenumformung erscheint es nötig, vorerst kurz auf das Wesen der Erosion einzugehen: Mit der Bewegung zweier Mittel gegeneinander ist, sobald sie sich unter einem gewissen Druck berühren, notwendig Reibung und somit auch Erosion verbunden. Es muß also die Erosion solange andauern wie die Bewegung selbst, auch dann noch, wenn die Akkumulation zur Zeit schon vorherrscht und die Erosionswirkung verschleiert. Die absolute theoretische Erosionsterminante der Gravitationsströme ist von diesem Gesichtspunkte aus die Horizontale, denn auf ihr muß jede Schwerebewegung erlöschen. Da jedoch die für die Erosion in Betracht kommenden Mittel infolge der wirklichen Widerstände schon auf kleinsten Böschungen stabil werden, muß in der Tat der Zustand der Ruhe schon früher, noch ehe die Horizontale erreicht ist, bei dem für das bestimmte Mittel auf dem betreffenden Untergrunde kennzeichnenden Ruhewinkel eintreten. In allen Fällen aber muß, gleichbleibenden Reibungskoeffizienten vorausgesetzt, die Erosionsterminante eine Gerade (bzw. Ebene) sein, denn nur sie hat in allen Punkten die gleiche, die Mindestneigung. Das gilt auch für den in der Natur verwirklichten Fall, daß die Menge (Masse) des Erosionsmittels in der Richtung des Gefälles zunehme, denn die gleiche Arbeit,

die eine große Menge des Erosionsmittels auf einer bestimmten Böschung zu vollbringen vermag, gelingt auf derselben Böschung auch einer kleinen Menge, nur in entsprechend verlängerter Zeit. Im Wesen der Erosionsterminante ist aber gelegen, daß die zu ihrer Ausbildung verbrauchte Zeit beliebig lang sei.

De Martonne geht nun in seiner „théorie mécanique“ (5, 6) zur Erklärung der glazialen Einwirkung auf fluviatile Gefällsteilen von dem Satze aus, das Eis erodiere, wie alle Flüssigkeiten, durch Reibung und die Änderungen der Erosion müßten sich somit durch die Änderungen der Reibung erklären lassen (6, S. 135). Die Änderungen der Reibung seien aber offenkundig abhängig von der Geschwindigkeit ( $v$ ), von der Oberflächenneigung des Gletschers ( $a$ ), von der Gletschermächtigkeit ( $h$ ), vom spezifischen Gewicht des Eises ( $D$ ) und vom Reibungskoeffizienten ( $A =$  „adhérence du glacier a son lit“). Daraus ergibt sich seine Formel  $F$  (Reibung)  $= gv^2hDA \cos a$ . Von den einzelnen Faktoren sei  $D$  relativ konstant,  $A$  ändere sich bedeutend mit der Neigung und der Mächtigkeit (eine Ansicht, der man kaum beistimmen kann<sup>3)</sup>),  $h$  sei groß und sehr veränderlich,  $v$  klein und relativ konstant;  $A$  und  $h$  seien der Neigung ( $a$ ) verkehrt proportional,  $v$  zwar direkt proportional, da die Geschwindigkeit aber klein sei, falle dies nicht ins Gewicht. Er kommt daher zu dem Schlusse: „C'est par son poids que le glacier agit surtout“ (6, S. 136); die Maxima der Erosionsleistung müßten daher in den Flachstrecken, also ober- und unterhalb der Stufen gelegen sein. Demzufolge würden die Stufen nicht beseitigt, sondern verstärkt.

Für diese Schlußfolgerung scheinen mir die Prämissen unzureichend: aus dem Resultate, die Maxima der Reibung liegen ober- und unterhalb der Stufe, läßt sich meines Erachtens nur die Erhaltung der Stufen, nicht ihre Verstärkung ableiten. Auch scheinen mir die von Lautensach gemachten Einwürfe (7) stichhaltig, ganz besonders, soweit sie das Glied  $v$  betreffen. Lautensach betont, daß  $v$  in der Formel kein Additionsglied sei, sondern ein Faktor und daher, ob groß oder klein, im Produkte voll sich auswirke. Diese Bedeutung der Strömungsgeschwindigkeit stehe auch mit seinen im Gelände gewonnenen Ergebnissen im Einklang. Es müßte daher die Erosion gerade in Gefällsteilen einen Höchstwert erreichen und präglaziale Stufen müßten, „falls sie vorhanden waren, mit der Zeit von den eiszeitlichen Gletschern beseitigt“ (7, S. 149) worden sein. Zu dieser Folgerung steht jedoch Lautensachs eigenes Ergebnis über die Entstehung der Tröge und Trogschlüsse (vgl. u. a. 7, S. 131) in klarem Widerspruch. Es muß auch der von Lautensach aus der Bedeutung der Strömungsgeschwindigkeit gezogene Schluß als falsch bezeichnet werden: Daraus, daß die Erosion in Gefällsteilen ihren Höchstwert erreicht, ergibt sich nicht die Beseitigung,

<sup>3)</sup> Bei der gleitenden Reibung ist der Reibungskoeffizient in weiten Grenzen vom Normaldruck unabhängig, da das Verhältnis der normalen zur tangentialen Komponente ein konstantes ist. Die Größe des Reibungskoeffizienten ist in erster Linie durch die Beschaffenheit der sich reibenden Mittel bedingt, ferner durch die relative Geschwindigkeit, und zwar erreicht er seinen maximalen Wert interessanterweise bei sehr kleinem  $v$  (!, Grenzfall der Ruhe: Haftungskoeffizient  $>$  Reibungskoeffizient); die Techniker verwenden zum Ausdruck dieser Abhängigkeit empirische Formeln. Bei der Reibung von Flüssigkeiten liegen die Dinge noch viel komplizierter, insbesondere spielt die Temperatur eine bedeutsame Rolle.

sondern die Rückverlegung der Stufen; dies zeigt nebenstehendes Schema (Abb. 1). Eine Beseitigung der Stufen würde nur dann stattfinden, wenn die Erosionsleistung auf der oberen Staffel größer wäre als auf der unteren (Erniedrigung) oder im oberen Teil der Stufenwand größer als in ihrem unteren (Abschrägung). Hiefür kann jedoch kein Grund ausfindig gemacht werden.

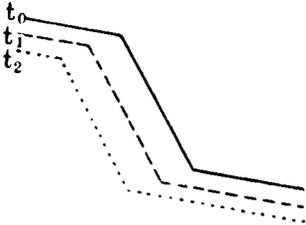


Abb. 1.

Im Gegenteil: Wird im Stufenbereiche nicht die gesamte Schwerbeschleunigung von den wirkenden Widerständen aufgezehrt, so kommt es zu einer beschleunigten Bewegung und, bei der Annahme der Abhängigkeit des Erosionsbetrages von der Geschwindigkeit, müßte sogar eine Versteilung der Stufe resultieren.

Ich möchte aber über Lautensach hinaus an de Martonne kritisieren die Art, wie er überhaupt die Geschwindigkeit in die Reibungsformel einführt.

In welchen Grenzen und in welcher Weise die Reibung von der Geschwindigkeit abhängt, ist heute noch für die Physik eine offene Frage, deshalb behandelt ja auch die Technik einschlägige Fragen auf empirischem Wege. Und in welcher Weise die Reibung eines Gletscherstromes von der Geschwindigkeit abhängt, ist eine zweimal offene Frage. Jedenfalls geht es nicht an, die Größe der Reibung einfach für offenkundig („évidemment“, 6, S. 135) von der linearen Änderung der Geschwindigkeit abhängig zu erklären.

An Stelle der komplizierten Formel de Martonnes glaubt Burchard (8) in der Coulombschen Reibungsformel einen einfacheren mathematischen Ausdruck für die Größe der äußeren Reibung des Gletschers gefunden zu haben:  $R = \mu N$  ( $R$  = Reibung,  $\mu$  = Reibungskoeffizient,  $N$  = Normaldruck). Burchard betont noch eigens die Unabhängigkeit der Reibung von der Geschwindigkeit (8, S. 149), und da er es für feststehend hält, „daß die äußere Reibung einen Maßstab abgibt für die Stärke der Erosion“ (8, S. 211), ergibt sich daraus, daß auch die Erosion von der Geschwindigkeit unabhängig sein müßte. Habe ich de Martonne den Vorwurf gemacht, daß er die Geschwindigkeit leichtfertig in die Reibungsformel eingeführt habe, so muß ich an Burchard ausstellend bemerken, daß er die Geltung der Coulombschen Reibungsformel verallgemeinere. Die Coulombsche Reibungsformel gilt nur für feste Körper und auch hier nur innerhalb nicht näher bekannter, jedenfalls enger Grenzen.

Da sich der Normaldruck ( $N$ ) mit dem  $\cos$  des Neigungswinkels ändert, ergibt sich auch für Burchard der größte Erosionsbetrag auf Flachstrecken.

An den Ausführungen Burchards kritisiert Henkel (9) u. a. das Fehlen des Faktors  $s$  (= Weg) =  $v \cdot t$  (Geschwindigkeit · Zeit) in der Formel für die Gletscherarbeit. Selbstverständlich hat Henkel vom physikalischen Standpunkt aus recht, wenn es sich darum handelt, einen Ausdruck für die absolute Größe der Erosionsarbeit zu finden. Doch bei der Behandlung des Stufenproblems handelt es sich nicht um diese absolute Größe, sondern lediglich um das Verhältnis des Erosionsbetrages in einem Talabschnitt oder -querschnitt zu dem in einem anderen Abschnitt oder Querschnitt. Ein solcher Vergleich hat aber nur einen Sinn bei Zugrundelegung gleicher Wegstrecken und es kann daher „ $s$ “ gleich

der Einheit gesetzt werden, wodurch es aus der Formel entfällt. Dies muß zu Burchards Gunsten betont werden.

Immerhin fühlte sich Burchard, augenscheinlich durch Henkels Kritik, veranlaßt, bei einer neuerlichen Darlegung (10, S. 53ff.) seiner Ansichten über die Wirksamkeit der Glazialerosion in seine „vollständige Formel für die zur Überwindung der Reibung notwendige Erosionsarbeit“  $s$  einzuführen und dafür  $v \cdot t$  einzusetzen. Da aber Burchard das Endergebnis der Erosion in der Glättung des Untergrundes (womit die Erosion praktisch zum Stillstand käme) sieht und es ihm belanglos erscheint, ob diese Glättung bei hoher Geschwindigkeit in kurzer Zeit oder bei niederer Geschwindigkeit in längerer Zeit erzielt wird, ergibt sich für ihn der Quotient  $\frac{v_0 t_0}{v_a t_a} = 1$ , womit also der Ausdruck  $A_0 : A_a = \mu N_0 v_0 t_0 : \mu N_a v_a t_a$  ( $A = \text{Arbeit}$ ) überginge wieder in die einfachere Form  $A_0 : A_a = \mu N_0 : \mu N_a$ , worin nur  $N$  variabel ist, und zwar eine Funktion von  $\cos \alpha$  ( $N = \text{Gesamtvertikaldruck} \cdot \cos \alpha$ ).

Erst aus Burchards Anschauung heraus, daß die Erosion des Gletschers mit erreichter Glättung des Untergrundes praktisch erlösche, können seine Worte „die zur Überwindung der Reibung notwendige Erosionsarbeit“ verstanden werden. Sie wären leichter verständlich, wenn er gleich statt „Erosionsarbeit“ „Glättungsarbeit“ schriebe. Gegen seine Anschauung muß aber mit Entschiedenheit Einsprache erhoben werden. Gilt die lineare Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten und Normaldruck zwar für die Reibung, so ändert sich die Glättung in sehr komplizierter, überhaupt nur empirisch feststellbarer Weise mit dem Reibungskoeffizienten und dem Normaldruck. Eine vollkommene Glättung — und selbst bei ihrer Erreichung müßte schon der Adhäsion wegen noch immer Reibung und somit auch Erosion stattfinden — kann bei andauernd hohem Normaldruck kaum je auch nur annähernd erreicht werden. Übrigens lehrt auch die Natur unzweideutig, daß der Standpunkt Burchards der Berechtigung entbehrt: auch ein erst jüngst verlassenes Gletscherbett (vgl. z. B. die Leichenbretter oberhalb Zermatt) ist keineswegs ein glattpolierter Felsboden; ja der mehr oder minder polierte Fels hat, flächenhaft betrachtet, im allgemeinen bei weitem nicht die Oberhand; es muß eben neben der schleifenden Erosion auch die splitternde Erosion und die Wirkung der subglazialen Entwässerung entsprechend gewürdigt werden. Diese Dinge sind so offenkundig, daß es verwundern muß, wie Burchard über sie einfach hinwegsehen konnte.

Man sieht also, daß weder de Martonnes noch Burchards Formel befriedigen können, besonders nicht, was die Rolle der Geschwindigkeit anbelangt. Man könnte noch versuchen, den Einfluß der Geschwindigkeit sich folgendermaßen zurechtzulegen: Bei größerer Geschwindigkeit durchteilt in der Zeiteinheit ein größeres Volumen (eine größere Anzahl von Gletscherquerschnitten) einen bestimmten Talquerschnitt und es gäbe daher gewissermaßen „mehr“ Reibung. Besondere Bedeutung kommt diesem „mehr“ an Reibung deshalb zu, weil, wie Machatschek in seinen Einwänden gegen die Burchardsche Formulierung der Größe der Glazialerosion ausführt (vgl. 11, S. 262f. u. 12, S. 220), „bei rasch strömendem Eis und rascher Abfuhr der Grundmoräne immer neue Gesteins-

oberflächen der Bearbeitung durch eingebackene Gesteinstrümmer ausgesetzt werden, wodurch die Ausschleifung des Bettes gefördert wird“. Diese Erklärung ist insbesondere dort anwendbar, wo eine Querschnittsverengung zum Teil auch durch erhöhte Strömungsgeschwindigkeit ausgeglichen wird; sie ist aber nur mit Einschränkungen anwendbar, wo erhöhte Geschwindigkeit bei gleichbleibendem Querschnitt nur durch erhöhtes Gefälle bewirkt wird (und darum handelt es sich hier), denn das Sekundenvolumen ist letzten Endes nur von den Lieferungsverhältnissen des erodierenden Mittels (bei Wasser und Eis also vornehmlich von klimatischen Faktoren) abhängig. Erhöhtes Sekundenvolumen an Gefällsteilen bedingt sogleich und immer einen Ausgleich im oberhalb folgenden Abschnitt. Nur Flüsse vermögen einen gewissen „Zug“ nach obenhin auszuüben, Bäche jedoch nicht und auch Eisströme verhalten sich gegen Zugbeanspruchung spröde, sie zeigen vielmehr den Ausgleich, indem einerseits die Eismächtigkeit an der Stufe abnimmt und andererseits oberhalb große Querspalten aufreißen: wohl aber ist es einleuchtend, daß auch in diesem Falle der Strömungsbeschleunigung, der rascheren Abfuhr der Grundmoräne eine nicht zu unterschätzende Bedeutung für die Ausschleifung des Gletscherbettes zukommt, da ja die Lieferungsverhältnisse der Grundmoräne von der Gesteinsaufbereitung und somit auch von der mehr oder minder schnellen Gesteinsentblößung abhängen und da ja die zum Teil den gewachsenen Fels zeigenden Gletscherbetten offenbaren, daß zumindest stellenweise nicht die Transportleistung des Gletschers der Gesteinsaufbereitung nachhinkt, sondern die Gesteinsaufbereitung der Transportleistung und die Gletscher daher mancherorts mehr Material zu beseitigen vermöchten, wenn es ihnen hinreichend aufbereitet dargeboten würde.

Bei Betrachtung der Abhängigkeit der Erosionsleistung von der Reibung löst sich also das Problem des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit nicht befriedigend (der Reibungskoeffizient steht sogar in umgekehrter Abhängigkeit von der Geschwindigkeit!). Diese Frage (d. h., um Mißverständnisse zu vermeiden, die Entscheidung, ob ein und dasselbe Volumen des erodierenden Mittels, mit verschiedenen Geschwindigkeiten durch einen bestimmten Querschnitt bewegt, je nach der Geschwindigkeit verschieden große Reibung und damit Erosion hervorruft), muß im allgemeinen und im einzelnen von Physik und Technik beantwortet werden. Es hängt die Erosionsleistung aber gar nicht nur vom Reibungswiderstand ab; es ist falsch, wenn de Martonne sagt „Comme tous les fluides, il“ (le glacier) „érode par frottement et les variations du frottement doivent expliquer celles de l'érosion“ (6, S. 135); es soll bestritten werden, auch wenn es Burchard für unbestreitbar hält, „daß die äußere Reibung einen Maßstab abgibt für die Stärke der Erosion“ (8, S. 211).

Neben dem Reibungswiderstand ist vielmehr auch der Trägheitswiderstand zu berücksichtigen, der in Abhängigkeit von der Form der Erosionsbahn, zufolge der den Gravitationsströmen sich entgegenstellenden unmittelbaren Hindernisse sich auswirkt. Das ist bisher nicht in Betracht gezogen worden, aber es ist unerläßlich. Ein Beispiel erläutert: Die stärkste Brise vermag ein Schiff nur wenig zu bewegen, solange keine Segel gesetzt sind,

der stärkste Motor, mit voller Tourenzahl laufend, vermag nur dann seine volle Kraft zu zeigen, wenn hohe Übersetzung für hohen Widerstand sorgt.

Erosion zufolge Reibungswiderstandes und zufolge Trägheitswiderstandes muß methodisch scharf auseinandergehalten werden, wenn im Kräftespiel der Natur hier auch vielfach Übergänge gegeben sind. Ich möchte die Grenze der Erosion zufolge Trägheitswiderstandes gegenüber der zufolge Reibungswiderstandes dort gezogen wissen, wo der Schwerpunkt des erodierenden Querschnittes des Erosionsmittels infolge der Form der Erosionsbahn eine Ablenkung aus der Bewegungsrichtung erfährt. — Bei der Betrachtung der Form der Erosionsbahn wird die Rolle der Strömungsgeschwindigkeit um vieles verständlicher.

Für die Beseitigung von Abweichungen aus der Geraden in der Erosionsbahn, also von unmittelbaren Widerständen, ist die Größe der Bewegungsenergie des erodierenden Mittels, die ausgedrückt wird durch  $\frac{m v^2}{2}$  ( $m =$  Masse,  $v =$  Geschwindigkeit) maßgebend. Vom Standpunkte der wirkenden Widerstände aus ist die theoretische Erosionsterminante der Gravitationsströme die Senkrechte, denn nur auf der Senkrechten findet eine Schwerebewegung keinerlei Widerstände mehr.

Die Größe der Bewegungsenergie eines Gravitationsstromes ändert sich unter sonst gleichen Umständen mit dem  $\sin$  des Böschungswinkels jener Fläche, auf der sich die Schwerebewegung vollzieht. Sie wächst also mit zunehmender Neigung, während die Reibung abnimmt; je stärker die Neigung des Gravitationsstromes, desto größer seine Arbeitsfähigkeit.

Wie weit die Arbeitsfähigkeit als Erosionswirkung zur Geltung kommt, hängt ab von der Art, in der sich das Hindernis entgegenstellt. Trifft das bewegte Mittel senkrecht auf ein überlegenes Hindernis, so wird die gesamte Bewegung

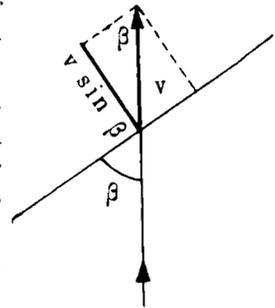


Abb. 2.

energie aufgezehrt, die Stärke der wirkenden Kraft beträgt also  $\frac{m v^2}{2}$ .

Trifft das bewegte Mittel schräg auf ein Hindernis, so wird nur jene Geschwindigkeitskomponente wirksam, die senkrecht auf der Angriffsfläche steht ( $v \sin \beta$ ),

die Größe der wirkenden Kraft beträgt also  $\frac{m}{2} (v \cdot \sin \beta)^2$ . Macht man die An-

nahme, der Widerstand sei durch eine kreisförmige Bahn gegeben, so ergibt sich als wirksame Kraft der zentrifugale Trägheitswiderstand = Masse mal Zentripetalbeschleunigung =  $m \frac{v^2}{r}$  ( $r =$  Krümmungsradius).

Nach diesen Ausführungen ist die Rolle der Strömungsgeschwindigkeit für die Erosionswirkung leicht verständlich, weil die Gravitationsströme sich ja nie in völlig geraden Bahnen bewegen. Man ist längst gewohnt, in horizontaler Richtung von Prallstellen zu sprechen und in vertikaler Richtung ist die Prallwirkung genau so, wenn nicht erhöht, einzuschätzen. Kleine, aus der Geraden

der Bahn aufragende Hindernisse werden zu Prallstellen. Ebenso bedeutet der Übergang von einer Gefällssteile, von einer Stufe zum vorgelagerten Flachstück eine Stätte örtlich gesteigerter Erosionsleistung. Konkave Gefällsstrecken bedeuten eine ununterbrochene Folge von Prallstellen, denn der Gravitationsstrom wird ständig aus der angestrebten Geraden abgedrängt, wodurch Bewegungsenergie in Erosionswirkung übergeführt wird. Je stärker die Ablenkung aus der Geraden, um so stärker die Einbuße an Bewegungsenergie, um so stärker die Erosionswirkung.<sup>4)</sup>

Man könnte nun den Einwurf machen, die geschilderte Prallwirkung müsse durchgehend eine Übertreibung des Reliefs hervorrufen, während bei der Wasserarbeit die Beobachtung gerade das Gegenteil lehre. Dem strömenden Eise hinderlicher wolle man schon eine Übertreibung des Reliefs zumuten, doch gerade bei ihm sei die Strömungsgeschwindigkeit so gering, daß man wieder nicht an eine Prallwirkung glauben könne.

Zum ersten Teil des Einwurfes ist zu sagen: teils führt die Wasserwirkung tatsächlich zur Übertreibung, zu einem anderen Teil würde sie es tun.

Sie führt tatsächlich zur Übertreibung, das sieht man an Wasserfällen, an steilen Bächen, kurz dort, wo keine Akkumulation stattfindet. Die Betten dieser Erosionslinien sind keine Geraden und streben auch gar nicht (oder richtiger gesagt nur „mit dem Kopfe durch die Wand“) der Geraden zu, sie bestehen vielmehr aus einer Folge von Stufen und Kolken, die immer weiter ausgestrudelt werden, bis schließlich die Wasseransammlung im Kolke eine weitere Wirkung des stürzenden Wassers verhindert. Die meisten Wasserfälle sind gestuft; sehr schön zeigt der Stuibenfall im Ötztal, wie die tosende Gewalt der Wasser auf die eingeschaltete und die an seinem Fuße gelegene Flachstrecke gesammelt wirkt.

Auch dort, wo ein steilfallender Bach auf einen flachen Talboden sich ergießt, würde er seine größte Erosionskraft entfalten, wenn nicht die Gefällsminderung ihn zwänge, aufzuschütten; die Beförderung von Lockermaterial wird ihm ja an Flachstrecken doppelt beschwerlich, da einerseits seine Bewegungsenergie sich mindert, aber andererseits die Beförderung des Lockermaterials in Flachstrecken gegenüber der in Steilstrecken erhöhte Energie fordert, die Last also gleichsam zunimmt. So obsiegt die Akkumulation häufig an jenen Stellen, wo bei Fehlen des Lockermaterials erhöhte Erosion stattfinden müßte. Die übertreibende Wirkung der Wasserarbeit wird also zum Großteil durch Bildung von Wasserbecken, durch Akkumulation unterbunden.

Zum zweiten Teil des Einwurfes: Die Geschwindigkeit des Eisstromes ist zwar gering, zum Entgelt hiefür zeichnet sich jedoch das Eis durch wesentlich geringere Plastizität, größere Starrheit aus und die Wirkung bleibt dieselbe, ob ein plastischer Körper mit großer Geschwindigkeit oder ein starrer Körper mit geringer Geschwindigkeit an ein Hindernis stößt: die Empfindung ist die gleiche, ob man von großer Höhe auf einen Wasserspiegel aufschlägt oder von geringer

<sup>4)</sup> Vgl. hiezu Erscheinungen aus dem täglichen Leben: stärkere Straßen- und Schienenabnutzung in Kurven, Aufschlagen auf die Felgen beim Durchfahren von Schlaglöchern, Schwierigkeit des Schwingens beim Schilauflauf im Übergang von Steil zu Flach, Leichtigkeit im Übergang von Flach zu Steil usw.

Höhe etwa auf den Boden; es ist auch bekannt, daß man mit einer rasch rotierenden Papierscheibe Holz sägen kann. Starrheit ist gewissermaßen eine Funktion der Geschwindigkeit und Geschwindigkeit kann durch Starrheit vertreten werden. Mit Rücksicht darauf jedoch, daß beim strömenden Eise weniger die Geschwindigkeit als seine Starrheit maßgebend ist, dürfte es sich empfehlen, statt von der Wirkung der Zentrifugalkraft oder von der Prallwirkung von „Krümmungsdruck“ zu sprechen, da der erhöhte Erosionsdruck in Krümmungen der Bahn vom Eise durch das Widerstreben, das es der Abkrümmung entgegengesetzt, hervorgerufen wird.

Und da das Eis nicht dort aufschüttet, wo seine Bewegungsenergie nachläßt, sondern wo es schmilzt, und da es auch die Fähigkeit besitzt, aufwärts zu fließen, wird im Gegensatz zum fließenden Wasser beim Eise die auf Reliefübertreibung zielende Arbeit nicht unterbunden.

Erkennt man also den Erosionsbetrag nicht nur von der Größe des Reibungswiderstandes (also u. a. von der Neigung der Erosionsbahn) abhängig, sondern ganz wesentlich auch von der Größe des Trägheitswiderstandes (von der Form der Erosionsbahn), so erscheint es ganz natürlich, ja notwendig, daß vorgegebene Stufen vom Eise verschärft werden, da ja nur der Stufenfuß, nicht aber die Stufenkrone, eine Stelle maximaler Erosionsleistung ist. Diese örtlich gesteigerte Erosionsleistung am Stufenfuße bedeutet dem unterhalb folgenden Talabschnitt gegenüber eine Rücktiefung, womit sich das gesellige Auftreten von Stufe und Becken begründet. Ich kann Lehmann daher nicht ganz beipflichten, wenn er die Becken im Genovatale durch verminderte Erosionsleistung an den Riegeln und nicht durch vermehrte am Fuße der Stufe (2, S. 15f.) erklärt. Gerade die Verschüttung des Stufenfußes läßt ja darauf schließen, daß hier eine Hohlform nachträglich wieder ausgefüllt wurde; in anderen Fällen, wo die Zuschüttung noch nicht so weit gediehen ist, so z. B. in zahlreichen Durchgangskaren, ist der Zusammenhang Stufe—Becken auch der direkten Beobachtung zugänglich.

Örtlich gesteigerte Erosionsleistung durch glazialen Krümmungsdruck kommt auch im Talquerschnitt zur Geltung; sehr häufig kann man in Tälern, deren heutige Ausgestaltung durchaus vom Eise herrührt, die Beobachtung machen, daß in Talwindungen (als genaues Analogon zu fluviatilen Prallhängen) die Gehänge auf der konkaven Seite übersteilt sind (vgl. z. B. die Gehänge des S-förmig gekrümmten Trennungsrückens zwischen Hauer- und Lehnbachtal, die bei Längenfeld ins Ötztal münden; s. Karte des D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai, Bl. I). Es muß auch auffallen, daß gerade gegenüber der Ötztalmündung der gewaltige Tschirgantbergsturz niederging, und zwar mindestens zweimal, was auf eine andauernd oder wiederholt wirkende Ursache hinweist, daß gerade gegenüber der Sellrainmündung die übersteile Martinswand ragt, daß gerade an der Zillertalmündung auch ein Bergsturz niederging. Für die Entstehung solcher der Bergsturzbildung förderlicher Übersteilen ist die auch anderorts nicht selten an Eisstrommündungen sich auswirkende glaziale „Prallwirkung“ verantwortlich zu machen.

So wie das Bestreben des Eisstromes, die gerade Bahn beizubehalten, einerseits zu einer Übertreibung des Reliefs führt, kann das nämliche Bestreben andererseits einen Ausgleich des Formenschatzes bewirken; dies zeigt sich z. B.

im Niederschleifen von Schwellen und Trennungsrücken, ganz besonders aber in der Streckung der Täler infolge Abstutzens der Gehängesporne.

Am Schlusse dieser Ausführungen, die insbesondere den Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit auf die Erosionsleistung prüften, könnte es vielleicht

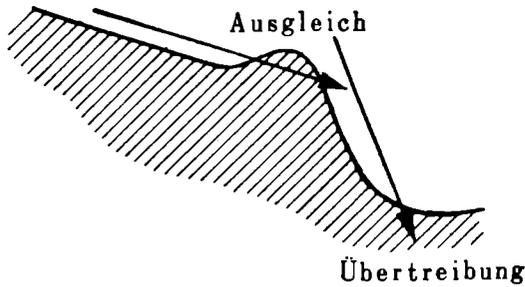


Abb. 3.

wünschenswert und auch relativ einfach erscheinen, eine Formel für die Erosionsleistung aufzustellen. Ich möchte davon jedoch Abstand nehmen aus der Erwägung heraus, daß hiedurch Genauigkeit in der Erfassung des Naturvorganges vorgetäuscht würde, während sich die Buntheit der Natur fürwahr nicht in die spanischen Stiefel einer Formel schnüren läßt. Um das Ver-

halten des Gletschers gegenüber seinem Untergrund aber bloß „zu beleuchten“ (13), halten wir Worte geeigneter als eine mathematische Formulierung.

## II. Der Trog.

Die Form des zusammengesetzten Trogtales hat ihre, wie man heute wohl sagen kann, endgültige Lösung in der Annahme eines der Vereisung vorangehenden fluviatilen Einschnittes gefunden; darauf weist ja auch die häufige Asymmetrie der Trogschultern hin, die rein glazial schwer begreiflich wäre, die dagegen nicht selten noch die fluviatile Mäandrierung wiederspiegelt. Bedeutet somit die Einsenkung des U des Richterschen Troges in die flacheren Hochtalgehänge kein Problem mehr, so ist die Frage nach der Ursache der glazialen Versteilung der Gehänge, die ein wesentliches Moment der Trogform ist, dem Verständnis noch nicht völlig erschlossen. Besonders schwierig gestaltet sich die Frage deshalb, weil das Eis nicht allen Tälern oder Talabschnitten, die es durchfloß, den U-Querschnitt einprägte. Dieser Umstand bedeutet sogar der Schweizer Schule einen Einwand gegen die Glazialerosion überhaupt; die Anhänger der Eiserosion hingegen ersehen daraus, daß das Eis je nach der Vorform verschieden wirksam war; so ist Machatschek (11, S. 263) der Auffassung, daß dort die Trogform am reinsten zur Ausbildung gelangte, wo gut entwickelte Kerbtalstrecken von der Vereisung betroffen wurden; zu ähnlicher Anschauung kommt auch Burchard (10, S. 200).

Gehänge von ähnlicher Steilheit wie die Trogwände finden sich in fluviatilen Tälern vornehmlich an Unterschneidungsstellen; es nimmt daher nicht Wunder, wenn man auch für die Entstehung der Trogwände fluviatile Unterschneidung verantwortlich machte, wie es Brunhes (14) getan hat, indem er den Trog als das Resultat zweier unter dem Eise längs der Talflanken wirkender Gerinne auffaßte. Im Gegensatz hierzu findet sich bei Richter (15, S. 54) die Ansicht, die Trogwände danken ihre Steilheit der Unterschneidung durch stadiale Eisströme. Dies ist auch Distels (16) Auffassung. Nach Penck (4, I, S. 377)

ist die Trogform jedoch hocheiszeitlicher Entstehung und die Wirkung der Stadien beschränkt sich auf eine mehr geringfügige Modifizierung. Drygalski (17) möchte die Gehängeunterschneidung auf ein seitlich, gegen die Ufer gerichtetes Quellen des Eises zurückführen, eine Auffassung, die durch Beobachtung nicht hinreichend gestützt erscheint.

Faßt man das strömende Eis als Flüssigkeit auf, so muß sich zufolge des hydrostatischen Druckes, dessen Größe abhängig ist vom Gewichte der auflastenden Flüssigkeitssäule und der daher mit zunehmender Tiefe wächst, eine erhöhte Abnutzung der tieferen Wandteile des Gletscherbettes ergeben; die Versteilung der Gehänge wäre also die Folge der bedeutenden Mächtigkeit der Eisströme. Es geht jedoch nicht an, das strömende Eis schlechthin als Flüssigkeit zu bezeichnen, fehlt ihm doch schon eines der wesentlichsten Merkmale der Flüssigkeiten, die praktische Volumskonstanz. Wenn es aber andererseits infolge der sehr beschränkten Formenkonstanz auch nicht festen Körpern gleicht, wird es doch billig sein, das Verhalten des strömenden Eises auch unter dem Gesichtspunkte der mechanischen Eigenschaften fester Körper zu würdigen, da ihm immerhin eine „ganz beträchtliche Torsions- und Biegefestigkeit zukommt und es Deformationen einen großen Widerstand entgegengesetzt“ (vgl. 18, S. 325). Doch wird man im Bewußtsein der Mittelstellung des strömenden Eises zwischen festen Körpern und Flüssigkeiten die für feste Körper gültigen Gesetze auch nur mit Vorbehalt für das strömende Eis gelten lassen dürfen.

Ampferer (19, 20) denkt sich, das strömende Eis als festen Körper mit einer gewissen Druckfestigkeit ( $25 \text{ kg/cm}^2$ ) betrachtend, den Eiskörper in eine Anzahl übereinanderliegender Gewölbe zerlegt, „von denen jedes imstande ist, sein eigenes Gewicht zu tragen. Aus dieser Anordnung ist sofort ersichtlich, daß in einem solchen Tale, wenn dasselbe für die Druckfestigkeit des Eises nicht zu weit ist, an der tiefsten Stelle nur ein geringer, dagegen auf den mittleren Seitenwänden ein sehr bedeutender Druck lasten muß (19, Fig. 17). Mit Hilfe dieses einfachen Schemas ist es leicht begreiflich, warum die Gletscher stets die V-förmigen Täler in U-förmige verwandeln, da die Hauptlast eben an die Seitenwände hingepreßt und daran weitergeschoben wird.“ (19, S. 155f.).

Daß die Auffassung der Eisströme als Gewölbekomplex eine gewisse Berechtigung hat, zeigt schon die Tatsache unter dem Eise bestehender Hohlräume, die die subglaziale Entwässerung erst ermöglichen. Besonders auffällig ist dies z. B. bei der Schlucht des Hochjochfernerabflusses in den Ötztaler Alpen (vgl. Karte des D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai, Blatt IV), die, obwohl noch in jüngster Zeit unter dem Eise gelegen, keinerlei Schlifffspuren zeigt; sie wurde also vom Eise über- und nicht durchflossen.

Auch wenn man mit Crammer, Rekstad usw. die Blätterung des Gletschereises „als die durch die Bewegung des Gletschers und den seitlichen Druck, den der Eiskörper beim Übergang aus den weiten Firnbecken in das enge Gletschertal erleidet, umgebildete Firnschichtung“ (vgl. 21, S. 446) auffaßt und senkrecht auf die Blätter die Drucklinien konstruiert, ergibt sich das Bestehen von Gewölbepansungen im Eiskörper.

Bei gegebener Biegungsfestigkeit (die sich beim Eise stark mit dem Druck ändert) und gegebener Wölbhöhe ist die Tragfähigkeit eines Gewölbes abhängig von der Spannweite, also von der Entfernung der Widerlager. So erklärt sich, „warum die Eisströme die Talweitungen zu Wannen ausschiffen und an den Engen Schwellen stehen ließen“ (19, S. 156), denn in Talweitungen müssen ja die Eisgewölbe ihre Spannung ganz oder teilweise verlieren, wodurch der Gletscherdruck weniger auf den Gehängen, stärker auf dem Talboden lastet. Während nach de Martonne infolge der wachsenden Eismächtigkeit gerade die Talengen stärker eingetieft, also zu Becken gestaltet werden müßten (5, S. 306), was mit der Natur im Widerspruch steht, wird die Gewölbetheorie den natürlichen Verhältnissen völlig gerecht.

Hier liegt auch der Schlüssel zur Einsicht, weshalb nicht alle Täler oder Talabschnitte durch die Vereisung den U-Querschnitt des Troges erhalten konnten. Aus den Untersuchungen im Gelände ergibt sich, daß dort die Trogform am besten ausgebildet ist, wo schon voreiszeitliche Kerbtalstrecken von einer gewissen, bescheidenen Tallichte nicht mehr durch späteren fluviatilen Angriff betroffen wurden; dagegen blieben Engstrecken (z. B. die Brandschlucht im Ötztal zwischen Huben und Sölden oder die Schöllenschlucht oder die zahlreichen Ausgleichsschluchten an der Mündung der Hängetäler) als solche erhalten und zeigen auch voreiszeitlich schon sehr weite Talstrecken (z. B. die großen Becken im Ötztal oder die großen alpinen Längstäler) kaum die Trogform. Die Gewölbetheorie vermag diese Verschiedenheiten der glazialen Umformung zu erklären: In einem Engtal, wo die Spannweite der einzelnen Gewölbeschichten des das Tal durchfließenden Eisstromes gering ist, vermag jede sich zu einem Gewölbe ordnende Eisschicht sich selbst zu halten, ohne einen stärkeren Druck auf die Unterlage auszuüben; das Gewicht wirkt vorwiegend auf die Widerlager, und da es sich in diesem Falle auf die gesamte Fläche der Widerlager (Gehänge) verteilt, bleibt die Wirkung relativ gering und die ursprüngliche Form erhalten.

Ist die Entfernung der Widerlager jedoch bedeutender, so werden zunächst in den oberen Schichten, deren Spannweite größer ist, die „Wölbsteine“ einsinken und die Schichten daher auf die Unterlage drücken. Sind die unteren Gewölbeschichten zufolge der nach unten abnehmenden Lichte des Querschnittes hinreichend tragfähig, so werden sie einen um so stärkeren Druck auf die Widerlager ausüben und somit die unteren Gehängeabschnitte stark angreifen und dadurch das Gesamtgehänge versteilen (Bildung des U-Querschnittes).

Ist die Entfernung der Widerlager jedoch so bedeutend, daß auch die unteren Schichten sich nicht selbst, geschweige denn noch eine aufgebürdete Last zu tragen vermögen, so wird der Eisdruck zum Großteil auf die Talsohle wirken, während die Gehänge relativ geschont bleiben. (Mangel der Trogform in den großen Tälern, Übertiefung in weiten Talabschnitten im Gegensatz zur Schonung des Talgrundes in engen.)

Für die Erklärung der Trogenstehung durch Gewölbedruck scheint auch zu sprechen, daß die typischen Trogtäler ihrem Querschnitt nach etwa der gleichen Größenklasse zuzuzählen sind (vgl. auch 16, S. 82 und Anmerkung S. 97).

Da das Eis die Täler jedenfalls erheblich ausgeweitet und die Gehänge

versteilt hat, sei dies nun infolge des hydrostatischen Druckes oder der Gewölbespannung, erhebt sich die Frage, wie trotzdem Reste alter Talböden oder -gehänge erhalten bleiben konnten. Bei roher Überlegung möchte man meinen, daß mit einer Ausweitung des Querschnittes normalerweise die schrittweise Beseitigung jedweder Gehängestufung Hand in Hand gehen müßte. Genauere Überlegung läßt jedoch bei glazialer Ausweitung gerade die Erhaltung, ja wohl sogar die Betonung der Gehängetreppung als den normalen Fall erkennen.

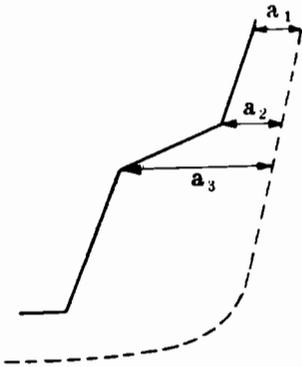


Abb. 4.

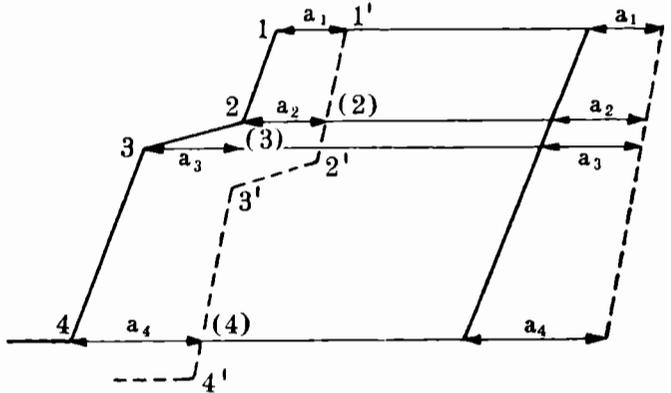


Abb. 5.

Abb. 4 zeigt, daß für den Fall der Beseitigung der Gehängestufen der Betrag der Lateralerosion sprunghaft von  $a_2$  zu  $a_3$  wachsen müßte, wofür nur bei ganz extremen Maßverhältnissen Gründe angeführt werden könnten; normalerweise muß man jedoch annehmen, daß die Größe der Lateralerosion annähernd linear mit der Tiefe wachse, wie es Abb. 5 veranschaulicht. In der Zeiteinheit wandert P. 1 um den Betrag  $a_1$  nach  $1'$ , in der gleichen Zeit käme P. 2 um den Betrag  $a_2$  ( $> a_1$ ) nach (2), da aber Abschnitt 2—3 selbst tiefer gelegt wird, gelangt P. 2 tatsächlich nach  $2'$  und P. 3 nach  $3'$ , ebenso P. 4 nach  $4'$ . Da flache Gehänge weniger glazial versteilt werden als steile ( $a_3 - a_2 < a_2 - a_1$ ), verschärft sich sogar der Neigungsunterschied von 3—2 gegenüber 2—1 oder 4—3. Es müßten also glazial rückverlegte Gehänge die alte Terrassierung noch schärfer erkennen lassen als zuvor. Die Natur zeigt jedoch gerade bei glazial überformten Terrassen sehr häufig runde Übergänge zum Gehänge, so daß der Neigungsgegensatz verwischt wird. Die Ursache dieser Abrundung der Terrassenkanten erhellt aus der schematischen Abb. 6. In der Zeit  $t$  wird 3—2 nach  $3' - 2'$  erniedrigt, während 3—4 nach (3) — (4) rückverlegt wird.

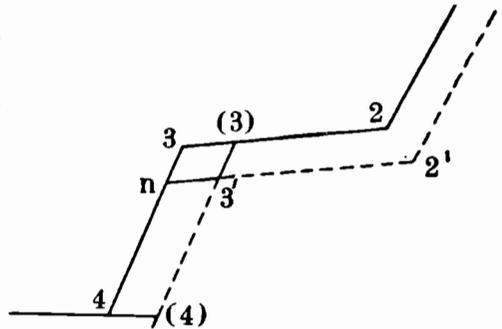


Abb. 6.

Das Teilchen  $3 - (3) - 3' - n$  wird daher in der Zeit  $t$  gewissermaßen zweimal beseitigt oder einmal schon in der Zeit  $\frac{t}{2}$  oder, real gesprochen, die Kante bei 3 verfällt der Abrundung, die sich zunächst rasch, dann immer langsamer vollzieht. — Dies läßt sich auch auf die Stufen im Tallängsschnitt übertragen.

Anders liegen die Verhältnisse bei fluviatil-denudativer Talausweitung. Da die Schnelligkeit des Rückwanderns eines Hanges eine Funktion seiner Neigung ist, würde der Hang 4 — 3 (wie in Abb. 6) wesentlich rascher zurückwandern als die Terrasse 3 — 2 und diese daher immer scharf unterschneiden, bis sie schließlich völlig aufgezehrt wäre.

Wir sehen also auch bei der Stufung im Talquerschnitt das Eis das vorgegebene Relief in seinen großen Zügen erhalten, ja sogar verschärfen, während die subaerile Abtragung zum Formenausgleich neigt.

### III. Die Kare.

Die Kare sind noch immer eines der umstrittensten Elemente des alpinen Formenschatzes. Schon was den Begriff angeht, besteht kaum mehr Übereinstimmung, als daß die Kare Hohlformen sind. Zu diesem übergeordneten Begriff fügt die strenge Kardefinition als wesentliche Merkmale: 1. Kesselform, 2. ungefähr dreiseitige Umrahmung durch steile Wände, 3. flacher Boden, der 4. in der Regel ziemlich unvermittelt in einen Steilabsturz übergeht (nach Böhm). De Martonne kennzeichnet in seinen noch heute durchaus lesenswerten Ausführungen über die Karbildung (22) die „eentlichen“ Kare als „niches de forme évasée, à fond faiblement incliné et entouré de parois abruptes“ (S. 10); diese Definition weiter ausführend, sieht de Martonne die Kare sich von Quelltrichtern unterscheiden durch ihr U-förmiges Querprofil und getrepptes Längsprofil, durch das Konvergieren der Gefällslinien nicht gegen einen Punkt, sondern gegen einen flachen oder rückgetieften, mit scharfem Knick sich absetzenden Boden, durch die im Kartenbild deutlich hervortretende Unabhängigkeit der Isohypsen von den Gewässerlinien.

Unter den so festgelegten Karbegriff fällt nur ein geringer Bruchteil aus der Unzahl von Hohlformen, die der Volksmund und, diesem zumeist folgend, die Karten als „Kare“ bezeichnen. Eine solch weite Begriffsfassung macht sich Creutzburg zu eigen, indem er als Kare „ganz allgemein Hohlformen bezeichnet, die eine dreiseitige, steilere Umrandung eines verflachten Bodens aufweisen“ (23, S. 13). Als extreme Karform stellen sich hier die Firnfelder dar. Ein wirklicher Fortschritt der Karforschung ist die Erkenntnis, daß von den „typischen“ Karen eine ununterbrochene „Formenreihe“ (24) über alle erdenklichen Zwischenstufen (talartige Kare, seichte Mulden und Nischen, Großkare) zu den Firnfeldern und Hochfluren, ja selbst Gipfelverflachungen (vgl. 25, S. 180) einerseits, rinnenartigen Karen (z. B. in Hochkalter-Westflanke, Bild in Ztschr. des D. Ö. A. V. 1915, S. 198) und Trichtern andererseits überleitet.

Zu dieser Übergangsreihe der Form kommt als zweites die Übergangsreihe der Lage: In genau derselben morphologischen Stellung, in unmittelbarer Nachbarschaft finden sich Firnfelder, Großkare, typische Kare, Trichterlare;

ja der Übergang talaus von Großkaren und typischen Karen zu Trichter karen und schließlich bloßen Wildbach- oder Geröllrinnen kann geradezu als Regel gelten (vgl. u. a. 15, 16, 23). Ein anderes, konkretes Beispiel von überzeugender Beweiskraft: Im rechten Gehänge des Rofentales, eines der Quelltäler des Ötztales, führt eine einheitliche Verflächungszone von den Firnfeldern des Hochjochferners über die Mulden des Kreuzferners und das Großkar des Eisferners zum typischen, lehnesselartigen Thalleitkar (P. 2862), dem offenkundig die Eckflur 2784 im Nordabfall der Thalleitpitze entspricht (vgl. Tafel I, Bild 1 und Karte des D. Ö. A. V. Ötztal-Stubai, Blatt IV). Ebenso sind in der Hinteren Karwendelkette das von hohen Felswänden umrahmte Larchetkar, das Große und das Kleine Riedelkar genaue Korrelate der ostwärts folgenden Großkare, wie Neunerkar, Marxenkar usw. (vgl. Karte des Karwendelgebirges d. D. Ö. A. V.). Die Zahl der Beispiele ließe sich leicht vermehren.

Aus der Tatsache der Übergangsreihe der Form und der Lage folgt, daß die verschiedenen Karformen grundsätzlich gleicher Entstehung sein müssen, daß jeder Versuch einer genetischen Spaltung der Natur Zwang antut.

Die Kare rein glazial, ohne jedwede Vorform zu erklären, wurde nur vereinzelt versucht (Philipp, Kaufmann, Levy). Selbst die klassische Kartheorie hält es für ausgeschlossen, daß am glatten Hang Firn oder Eis Kare erzeugen könnten; so schreibt Richter: „... immer Voraussetzung einer vorhandenen Einsenkung“ (15, S. 4) oder „offenbar vermögen selbst eigentliche Gehängegletscher, die an ungeteilten, dachartig fallenden Bergflanken liegen, nicht Kare zu erzeugen“ (S. 22). Als Vorform werden in der Literatur Quelltrichter (Richter, de Martonne usw.) oder flache Quellmulden (Creutzburg usw.), also „Wurzeln eines hydrographischen Netzes“ (Richter) oder auch gelegentliche, zufällige Nischen angeführt.

Für ihre Umformung zu Karen kommt zunächst, in Analogie zu den Tälern, die glaziale Erosion in Betracht; darauf legen u. a. Helland, Philipp, Salomon, Ampferer Gewicht; auch Aigner möchte sie nicht vernachlässigt wissen. Dem nahestehend verfißt Bowman (26) die Schnee-Erosion als bedeutungsvoll für die Bildung der Kare, die sich auf konkaven Hängen auch ohne bedeutendere Vorform vollziehen können sollte. Bowman geht hierbei von dem Zusammenhang aus, der zwischen Hangböschung, Menge des auflagernden Schnees und seiner Bewegungsfähigkeit besteht. Aus der Anwendung dieses Zusammenhanges, den Bowman graphisch darstellt, ergibt sich, daß bei Anhäufung von Schnee auf einem konkaven Gehänge etwa im Neigungsbereiche von  $30^{\circ}$  bis  $10^{\circ}$  ein Schneeüberschuß in dem Sinne besteht, daß auf dieser Böschung schon eine geringere Schneemenge in Bewegung geriete. Dieser Schneeüberschuß und daher Beweglichkeitsüberschuß sollte sich in lokal gesteigerter Geschwindigkeit und somit Erosion auswirken, was zunächst zur Bildung einer Vertiefung und schließlich einer Rücktiefung führen sollte. — Die aus der geistreichen Deduktion gezogene Folgerung erscheint mir jedoch zu mathematisch gedacht, nicht voll der Wirklichkeit entsprechend: da es sich in einem Schnee- oder Firnfeld um ein geschlossenes Bewegungssystem handelt, muß die lokale Überbeweglichkeit schiebend auf die (minderbeweglichen) hangabwärts gelegenen Schneemassen wirken und durch diese abgebremst werden, so daß die gesamte Schneemasse eine

mittlere, resultierende Geschwindigkeit annehmen wird, wodurch sich lokal gesteigerte Bodengeschwindigkeit und daher Erosion ausschließt. Lokal gesteigerte Erosion im Gefällsbereich  $30^{\circ}$  bis  $10^{\circ}$  könnte also nur infolge der hier lagernden größeren Schneemasse eintreten. Es ist jedoch zu bedenken, daß der als lokale Überbeweglichkeit sich äußernde Schneeüberschuß die genaue Vorbedingung zur Bildung von Oberflächenlawinen ist, die den Untergrund mehr minder unversehrt lassen und die von Zeit zu Zeit immer wieder den Schneeüberschuß beseitigen. Die Möglichkeit lokal gesteigerter Erosion erscheint also kaum gegeben. Übrigens könnte am glatten konkaven Hange die Nivation nur zur Bildung einer durchgehenden Rinne im Gefällsbereich  $30^{\circ}$  bis  $10^{\circ}$  führen; zur Erklärung der individualisierten Hohlformen der Kare sieht sich auch Bowman genötigt, Runsen oder Ähnliches im Gehänge anzunehmen.

Als besonders bedeutungsvoll für die Karentstehung wurde und wird die Wandverwitterung aufgefaßt (u. a. Johnson, Richter), die bei Hohlformen mit Firneinlagerung unter selten günstigen Bedingungen steht, da hier einerseits sich kein schützender Schuttfuß anzusammeln vermag, andererseits die an Randkluft oder Bergschrund angeblich besonders häufigen Temperaturschwankungen den Gesteinszerfall beschleunigen. Aus eben diesem Grund müßte die Wandverwitterung an der Schneegrenze einen Höchstwert erreichen, was Richter zur Annahme seines „Abtragungsniveaus der Schneegrenze“ veranlaßte. Damit schien auch die Erklärung für das gesellige Auftreten der Kare in horizontalen Höhengürteln gegeben; die Lage der Schneegrenze wäre maßgebend für den Karbildungsprozeß; finden sich mehrere Kargürtel übereinander, so entsprächen sie verschiedenen Schneegrenzlagen.

Wenn somit in Kürze die Auffassung über die Schneegrenzbedingtheit der Kare wiedergegeben wurde, so muß zugleich gesagt werden: eine konsequente glaziale Kartheorie, die diese Auffassung stützen könnte, ist noch durch niemanden und nirgends entwickelt worden. Eben diese Unklarheit erschwert sehr eine Stellungnahme, denn gegen einen im Nebel verborgenen Gegner ist es schwer anzukämpfen. Eigentlich müßten obige Zusammenhänge erst erwiesen werden, bevor Gegengründe geltend gemacht zu werden brauchten. Nur die weite Verbreitung obiger, wenn auch unklarer Anschauungen veranlaßt mich (wie andere, z. B. 24, 27, 28, schon zuvor), diese Auffassung näher zu prüfen.

Der Verdacht erscheint mir nicht unbegründet, daß in vielen Fällen nicht die Anschauung über den Karbildungsprozeß Anlaß war, einen Zusammenhang zwischen Karbildung und Schneegrenze zwingend anzunehmen, sondern daß aus der annähernden Höhenübereinstimmung eines Kargürtels mit irgendeiner Schneegrenzlage ein solcher Zusammenhang konstruiert wurde. So findet Levy (29, S. 102), daß die Höhe der Kare in den Schlierseerbergen „fast genau“ der Würm- bzw. Bühlschneegrenze entspräche, und sieht darin „einen sehr wichtigen Fingerzeig für das Verständnis der Karbildung überhaupt: die hier vorkommenden Kare sind in ihren beiden übereinanderliegenden Gürteln ursächlich (!? der Verf.) an zwei übereinanderliegende Lagen der eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Schneegrenze geknüpft“. Wie wenig stichhältig eine solche Argumentierung ist, zeigt schon der Umstand, daß ein Teil der Forscher, z. B. Penck, die Kare für hocheiszeitlich hält, ein anderer Teil, zu dem Levy gehört, sich

nicht scheut, unbekümmert um das gewaltige Ausmaß der zu leistenden Erosionsarbeit, die Kare für stadial zu erklären, weil eben leider nur eine stadiale Schneegrenze in der Nähe war. Irgendeine Schneegrenzlage würde sich da schließlich für jede Karhöhe finden oder konstruieren lassen, denn umgekehrt wollte man ja die Lage der Kare zur Schneegrenzbestimmung verwenden; hiemit käme man auf die Bahn Lucernas, der für jede Karmulde kurzerhand ein Stadium annimmt.

Um aber die ganze Unhaltbarkeit der Schneegrenztheorie zu begreifen, muß man sich vergegenwärtigen, was die „Schneegrenze“ eigentlich bedeutet. Die orographische Schneegrenze, als der untere Saum der perennierenden Schneeflecken eines Gebietes, ist eine mathematische Linie, eine Linie, die nur an wenigen Tagen im Jahre erreicht wird, ein Grenzwert, vergleichbar etwa den Wende- oder Polarkreisen, und genau so wenig, wie man diesen eine morphologische Bedeutung zumißt, kommt eine solche der orographischen Schneegrenze zu. Und gar die klimatische Schneegrenze ist vollends im Bereiche des Abstrakten gelegen, da sie irrealen Voraussetzungen trifft und einen vieljährigen Durchschnittswert darstellt. So geeignet und vielsagend sie als klimatisches Charakteristikum ist, so bedeutungslos ist sie für die Morphologie. Lediglich die örtliche Schneegrenze ist real, hat auch eine gewisse Beständigkeit der Lage (vgl. 30, S. 226) und ihr ist ein gewisser morphologischer Einfluß nicht abzusprechen.

Hätte die orographische oder klimatische Schneegrenze wirklich unmittelbar morphologische Bedeutung, so müßte auch in ihrer heutigen Lage eine Zone stärkster Gesteinsaufbereitung liegen, dann bedürfte es zur Schneegrenzbestimmung auch erst gar nicht komplizierter Methoden, sie wäre ja anschaulich gegeben. Indes ist in Wirklichkeit, wie jeder weiß, die ganze Zone über der Schneegrenze ein Gebiet starker Zerstörung. Darauf laufen ja auch Äußerungen hinaus wie: „Je höher wir steigen, desto stärkere Kältegrade wirken sprengend auf das Gestein, desto größere Temperaturunterschiede, desto mehr wird am Gefüge gelockert“ (Penck). Es ist auch unbewiesen, ob wirklich an der Schneegrenze die größte Häufigkeit der Schwankung um 0° liegt; mit Recht verweist Aigner (24, S. 209) auf die sehr wechselnde Strahlungstemperatur im Hochgebirge und jeder Bergsteiger weiß ein Lied zu singen von „Zähneklappern und Schweißtriefen“ innerhalb der kürzesten Zeit. Es ist auch gar nicht nur die Schwankung um den Nullpunkt maßgebend für den mechanischen Zerfall, sondern auch die Größe des Temperaturunterschiedes überhaupt und die Raschheit der Schwankung.

Es ist auch nicht zu verstehen, wie die Kare in ihrer Lage an eine Schneegrenze gebunden sein könnten, da selbst die glaziale Kartheorie die Kare zum Großteil als umgestaltete Quelltrichter an den Wurzeln eines hydrographischen Netzes auffaßt und man doch jenem fluviatilen System nicht zumuten kann, seine Wurzeln gerade dorthin gelegt zu haben, wo in der Folge eine Schneegrenze zu liegen kommen sollte.

Trotzdem aber halte ich, wie aus den folgenden Ausführungen noch erhellen wird, an einem ausschlaggebenden Einfluß der Vereisung für die Karbildung fest. Da eine glaziale Beeinflussung der Karvorformen aber natürlich nur erfolgen konnte, wenn diese über der Schneegrenze gelegen gewesen waren (nur

bei Durchgangskaren möglich auch ein geringes darunter), erscheint das Auftreten der Kare doch dazu verwendbar, um einen Mindestwert für die Höhe der diluvialen Schneegrenze festzustellen, nicht aber ihre genaue Lage.

Da im Alpeninnern die Kare infolge ihrer Höhe nicht durch eine hocheiszeitliche Schneegrenze bedingt sein können, wohl aber das Absinken des Karürtels annähernd mit dem der Eisstromhöhe gleichläuft (nach Penck Kare 100 bis 200 m darunter gelegen), erklärt Penck die Kare im Eisstrombereich in ihrer Lage durch die Eisstromhöhe vorgezeichnet. Schon Fels hebt hervor (28, S. 53), daß Penck diesen Zusammenhang einfach behauptet, ohne auch nur den Versuch einer Begründung zu machen; auch findet Fels, daß dieser Zusammenhang im Karwendel gar nicht gegeben sei; die Anlage der Kare folge vielmehr anderen, älteren Gesetzen (S. 54).

Für das wenigstens im rohen gegebene Gleichlaufen von Karhöhe und Eisstromhöhe in vielen Alpentteilen führt Creutzburg zur Erklärung an (23, S. 76), daß beim Anwachsen des Eisstromes in Karniveauhöhe infolge der in dieser Höhe großen Tallichte die weitere Mächtigkeitzunahme nur mehr sehr langsam erfolgen konnte. Fast noch wichtiger möchte mir scheinen, daß mit Erreichen der Karniveauhöhe der Abfluß der Eismassen ein derart ungehinderter war, daß die zuvor aktive Eisbilanz hier zu einem Ausgleich kam.

Einen unlösbaren Widerspruch bedeutet es auch, wenn Penck es andererseits für die Karbildung für unerläßlich hält, daß die Eiszeit mit einer Firnflecken- und Kargletscherperiode begonnen habe (damit eine apere Hinterwand entstehen konnte), denn zu dieser Zeit hätten noch keine Eisströme bestehen können und diese hätten daher auch nicht der Karbildung den Weg vorzeichnen können.

Ein Zusammenhang zwischen Schneegrenz- oder Eisstromhöhe und Karanlage ist somit abzulehnen.

Hingegen spricht Natur und Theorie für die Bedingtheit der Kare durch ein altes hydrographisches Netz. Dieser Ansicht, die durch Ampferer, Klebelsberg, Creutzburg, Wolf, Worm, Fels u. a. vertreten wird und heute vielleicht schon die herrschende ist, stehen auch die Klassiker der Karforschung<sup>5)</sup> eigentlich schon ganz nahe und es ist nur dem verhängnisvollen Irrtum, die Kare in Abhängigkeit von der Schneegrenze zu setzen, zuzuschreiben, daß es 20 Jahre brauchte, bis die Erkenntnis von der fluviatilen Karanlage voll zum Durchbruch kam.

Die Natur zeigt jedem Unvoreingenommenen in vielen Fällen ganz offenkundig den unmittelbaren Zusammenhang der Kare mit Terrassen; im Ötztal sehen wir die Kare als Seitentäler jenes Stockwerkes, dessen Reste im jeweiligen Haupttal als Trogschulter fungieren. Ebenso findet sich in der Literatur immer wieder der Hinweis auf solche Zusammenhänge (z. B.: „Der Karboden gehört in den Bereich der Trogschulter“ 4, I, S. 314; „In den Alpen und auch im Rila-gebirge ist die überwiegende Mehrzahl der Kare so innig an das präglaziale Talsystem gebunden . . .“ 15, S. 10; „Trogschulter und Karböden verschmelzen

<sup>5)</sup> Zum Beispiel Richter: „Die Wurzeln dieses hydrographischen Netzes, die unter den Kämmen beginnenden und sich allmählich vereinigenden Anfänge der Furchen und Rillen, waren, als die Verfirnung eintrat, die Stellen, wo sich Kare entwickeln und bilden konnten.“ (15, S. 21.)

zu einer Fläche“ 16, S. 23 und 75). Auch Wolf im Rofan und Fels im Karwendel betonen die direkten und ununterbrochenen Übergänge von Hochflurresten zu Karen (vgl. 28, S. 59f.). Die Offenkundigkeit dieses Zusammenhanges wird kaum dadurch gestört, daß die Kare, besonders die talartigen, glazial eingetieft wurden, denn die Terrasse, zu der die Kare in Verbindung treten, wurde selbst ja auch tiefer gelegt und ihre Reliefenergie ist unbeschadet ihrer Einheitlichkeit immerhin so bedeutend, daß kleine Höhenunterschiede nicht ins Gewicht fallen.

Die Kare als umgestaltete Seitentäler eines früheren Talsystems aufzufassen, wird auch dadurch gerechtfertigt, daß sie heute die Seitentäler etwa 4. bis 5. Ordnung (bezogen auf die Haupttäler der Alpen) darstellen. Und jenem Talsystem, dessen Reste heute als Terrassen zu den Karen in Beziehung treten, muß notwendig bereits eine der heutigen Zerkarung entsprechende Dichte des Talnetzes zuerkannt werden, denn seinem Gefälle und der Breite seiner Haupttäler nach, mußte es ja bereits ein gewisses, fortgeschrittenes Entwicklungsstadium erreicht haben. Auch kann die Regelmäßigkeit der Karanordnung, sei es leitersprossenartig im Gehänge oder radial im Talschlusse, nur durch ein fluviatiles System erklärt werden.

Befinde ich mich also, was die Karanlage betrifft, in voller Übereinstimmung mit Fels (28), so kann ich ihm in seinen Ausführungen über die Karformung keineswegs beipflichten. Fels sieht mit Ampferer (20, S. 91) in den Karen die „verlassenen Talenden eines ausgeschalteten alten Reliefs“, die eben durch die „Ausschaltung“ zu Karen wurden (28, S. 66). Ohne die Ausschaltung wären das alte Relief und damit auch die Kare völlig aufgezehrt worden (S. 67). — Es ist gänzlich unverständlich, wie durch Erosionsbelebung, die ja die Ausschaltung des alten Reliefs bewirkte, der Zerstörung im Hochflursystem, bzw. Hochtalsystem, Einhalt geboten werden sollte. Bei einer zur Ausgangslage parallelen En-bloc-Hebung (dem für Fels günstigsten Fall) muß vielmehr der Zerstörungsvorgang auf der gehobenen Oberfläche genau so vor sich gehen, ja wenn man die wahrscheinliche klimatische Änderung (erhöhte Niederschlagsmenge) berücksichtigt, sogar stärker vor sich gehen als zuvor, da ja auch im fluviatilen System nur die Form des Erosionsbettes talauf rückschreitet, die Erosionsenergie aber natürlich durch Neigung und Wasser- und Geschiebemenge an der ins Auge gefaßten Stelle selbst und zugleich an den oberhalb folgenden Stellen bestimmt wird und daher talab fortschreitet. Ja, gerade durch das Rückschreiten der neubelebten Erosion, die junge Talstrecken gegen die alten Hochfluren vortreibt und die Gehänge unterschneidet, muß dem Bestand alter Restformen ein Ende bereitet werden und mir erscheinen daher nicht „die Kare und sonstigen Hochfluren in ihrem Bestande so gesichert, daß ihre Formen erhalten bleiben können“ (28, S. 67), sondern gefährdeter denn je; dies lehrt ja auch oft genug die bloße Anschauung (vgl. z. B. Tafel II, Bild 1).

Für Fels sind die Kare als ausgeschaltete Enden des Hochflursystems, das er ins Mittel- bis Jungmiozän datiert und das er für eine „Mittelgebirgslandschaft mit eingeschalteten Hochgebirgsrest- (? , der Verf.) formen“ (vgl. S. 59) hält, damit auch schon in „ihrer jetzigen Form (!, der Verf.) und Größe“ (S. 70) gegeben und es wäre daher „die morphologische Entwicklung nach dem

Mittel- bis Jungmiozän für die Entstehung der Kare nicht mehr von Bedeutung, wohl aber für ihre Erhaltung“ (vgl. S. 68). Die Bedeutung der Vereisung läge vornehmlich in ihrer Schutzwirkung (vgl. S. 42), jedenfalls hätte die Fortdauer der normalen voreiszeitlichen Denudationstätigkeit das Gebirge weit mehr angegriffen (wobei Fels vergißt, daß das Gebirge in seinem Schutt ertrunken wäre); der formenden Wirkung des Eises wäre nur zuzuschreiben: eine Verteilung der unteren Wandpartien und dadurch Verstärkung des schon voreiszeitlich bestandenen Knickes (S. 71), eine Verflachung und allfällige Rücktiefung des Karbodens (S. 73). In der Tat war Fels zu dieser Annahme als für ihn logisch einzig möglichen Ausweg gezwungen, denn er steht von vornherein auf dem Standpunkte, daß selbst die hocheiszeitliche Eisarbeit gering war, um so unbedeutender natürlich die stadiale; und da er erkennt, daß die Randkluftverwitterung (die er in Betracht zieht, während er die Eiserosion vernachlässigt) ihre optimalen Bedingungen in den Stadien findet, verbleibt ihm nur mehr die Möglichkeit der Annahme, daß die Kare als solche bereits von der Eiszeit übernommen wurden. So gipfeln seine Anschauungen in dem Satze: „Der Karbegriff muß aus dem glazialen Formenschatz herausgenommen werden“ (28, S. 76).

Ich kann nicht umhin, diese Forderung als eine völlige Verkennung des Karproblems zu bezeichnen. Ist Fels blind für die trotz aller Übergangsformen bestehende Eigenart der Kare? Hat er sich nicht vergegenwärtigt, zu welchen unmöglichen Vorstellungen über das voreiszeitliche Formenbild seine Anschauungen führen müssen? Man bedenke: Noch an den Talenden mehrere Kilometer breite Talböden, die zudem, oftmals gestuft, um mehrere hundert Meter auf kurze Entfernung ansteigen, mit Knick sich absetzen von Steilwänden, deren Ausdehnung und Schroffheit sich sehen lassen kann! Eine solche Formengemeinschaft ist auch im Kalk ausgeschlossen und wenn man diese, in einem petrographisch ausgezeichneten Gebiete gewonnene Auffassung kühn auf die ganzen Ostalpen überträgt, dann wirkt sie phantastisch. Und doch wird man Fels danken müssen, daß er auch diesen Weg der Erklärung beschritten hat, weil hiedurch seine Ungangbarkeit erwiesen ist. Die Kare müssen ein sogar sehr wesentliches Glied des glazialen Formenschatzes bleiben, denn das Nebeneinander von Steil und Flach, das beim fluviatilen Formenschatz eine Ungereimtheit bedeutet (ganz besonders an den Talursprüngen), ist für den glazialen Formenschatz ein Charakteristikum.

Der ganze Fragenkomplex, der sich um die Erscheinungsform „Kar“ schart, wiederholt sich in dem bis heute ungelösten Teilproblem der Kartreppe. Aus seiner Behandlung hoffe ich, zugleich weitere Anhaltspunkte für die Beurteilung der Gesamtfrage zu gewinnen.

Die bisherigen Bestrebungen zur Erklärung der Kartreppe versuche ich in drei Punkten zusammenzufassen: 1. Die Stadialtheorie, 2. die Stockwerktheorie, 3. die Mündungskartheorie Lehmanns.

1. Nach der Stadialtheorie entsprechen die einzelnen Staffeln oder Becken einer Kartreppe stadialen Endlagen des Kargletschers. Wäre diese Erklärung richtig, so müßten die Stadialmoränen sich mit den einzelnen Becken in Einklang setzen lassen, müßte die Ausdehnung der stadialen Gletscherzungen der Becken entsprechen, müßte wenigstens eine gewisse Übereinstimmung in der

Zahl und Höhenlage der Karstufen in benachbarten Karen vorliegen, müßten die Stadialgletscher, da von geringer Mächtigkeit, sehr lange stationär verharren haben.

Die Übereinstimmung Moräne—Becken ist wohl hin und wieder, vielleicht sogar oft gegeben, aber lange nicht regelmäßig; Fels macht im Karwendel immer wieder die Feststellung der räumlichen Getrenntheit. Umgekehrt finden sich sehr häufig Stadialmoränen auf einheitlicher Böschung und man müßte fragen: warum ist es hier zur stadialen Treppung gekommen, warum dort nicht? Die Ursache für das recht häufige Zusammentreffen von Karschwelle und Moräne sehen wir vielmehr darin, daß Gletscher auf steilem Gehänge viel feiner auf Schneegrenzverschiebungen reagieren als auf flachem, daß ein Gletscher, sobald er sich über den Stufenhang bis zur krönenden Schwelle (als Grenze zwischen Steil und Flach) zurückgezogen hat, hier erst durch stärkere Klimaschwankung oder in längerem Zeitraum zum weiteren Rückgehen veranlaßt werden kann, mit dem Rückzug bis zur Stufenkrone dort also relativ stationär wird. Auch betont Fels mit Recht, daß die Stadialgletscher nur kleine Teile der viel größeren Mulden bedeckten, daß sich also die stadialen Gletscherendlagen als durchaus nebensächliche Dinge charakterisieren (28, S. 55). Was die Übereinstimmung der Karstufen nach Zahl und Höhe betrifft, so ist sie nur in seltenen Fällen halbwegs gegeben, häufig aber finden sich ungestufte Kare neben reichgestuften, ja es muß geradezu dieser Mangel an Übereinstimmung als für die Kartreppung bezeichnend hervorgehoben werden; er macht sich viel zu oft und zu stark geltend, um aus wechselnden orographischen Verhältnissen allein erklärt werden zu können; dies ergibt sich aus der eigenen Beobachtung, das geht aber auch aus den in der Literatur verbreiteten Karlisten und Karbeschreibungen hervor. Und schließlich zur Dauer der Stadialzeiten: Nach den an rezenten Gletschern gemachten Beobachtungen ist die Annahme einer solchen Beständigkeit der Gletscherenden, daß bis zu 100 bis 200 m hohe Stufen entstehen könnten, nicht zu rechtfertigen. Schon Richter sagt: „... bleiben die noch viel zahlreicheren, in kurzen Entfernungen folgenden Karstufen ungeklärt, für die man doch nicht ebenso viele verschieden lang dauernde Gletscherstände wird annehmen wollen“ (15, S. 49); Richter hält es unter diesen Umständen für sicherer, „sich auf die Annahme zurückzuziehen, die Gletscher hätten die Eigenschaft, die in einem Tale vorhandenen Gefällsungleichheiten zu steigern.“ In ähnlicher Weise nimmt auch de Martonne präglaziale Unausgeglichenheiten als Ursache der Kartreppung an (31, S. 400ff.). Penck verhält sich zurückhaltend, hält es immerhin für möglich, daß innerhalb der hocheiszeitlichen Hohlform „gelegentlich Wannens als Zungenbecken späterer Stadien“ (4, I, S. 377) entstanden sind, spielt daneben aber auch auf die Möglichkeit der Konfluenzwirkung an (S. 378). Auch Burchard möchte die Karstufen vorwiegend glazial erklären, indem er eine sinngemäße Anwendung der Coulombschen Formel für ausreichend hält (8, S. 212); leider läßt er sich darüber nicht weiter aus.

Außer aus den eben geltend gemachten Gründen muß ich die Stadialtheorie der Kartreppung auch deshalb ablehnen, weil noch durch niemanden die Mechanik der stadialen Karstufenentstehung klargelegt wurde und sie mir überhaupt unvorstellbar ist. Mit dem Begriff „Zungenbecken“ wird viel Unfug ge-

trieben, auch bei der Erklärung von Talbecken. Man muß sich dessen bewußt sein, daß ein Zungenbecken nicht eine Stelle örtlich gesteigerter Erosion ist, sondern die Stelle erlöschender Erosion und daß es daher nur dem unterhalb folgenden Gefällsabschnitt gegenüber ein Becken bedeutet, nicht aber gegenüber dem oberhalb gelegenen.

2. Die Stockwerktheorie der Kartreppe, als deren Vertreter wir Wolf (27), Worm (32), Börner (33) namhaft machen, weist die verschiedenen Karstufen verschiedenen Talständen oder Stockwerken zu, die Karstufen wären also als Rückschreitstufen anzusehen. Diese Auffassung ist folgerichtig und kann auch, wird das Bestehen von Rückschreitstufen anerkannt (und dies scheint mir notwendig, vgl. oben), in ihren Grundzügen nicht geleugnet werden; läßt sich doch keine grundsätzliche Trennung zwischen gestuften Alpentälern und Kartreppen ziehen (vgl. 15, S. 47) und sind ja Kare nichts anderes als glazial umgestaltete Seitentäler (im weitesten Sinn) in einem alten hydrographischen Netze (siehe oben). Die Stockwerktheorie bedeutet tatsächlich einen namhaften Fortschritt in der Erklärung der Kartreppe, sie bedeutet aber nicht die volle Lösung des Problems.

Die Stockwerktheorie erfordert eine noch weitergehende Übereinstimmung der Stufen- und Beckenanordnung in benachbarten, ja überhaupt in einem Talssystem vorhandenen Karen als die Stadialthorie. Sie erklärt trefflich die Anordnung der Kare (Ursprungskare — Durchgangskare) in übereinandergelegenen Gürteln und die Einordnung der großen Karmulden in durchzuverfolgende Gürtel ist, wie das Schrifttum zeigt, in der Tat häufig möglich. Ich selbst habe für das Ötztal freilich die Feststellung gemacht, daß die Kare sich dem Stockwerk der Trogschulter zuordnen und daß die Zuweisung höher gelegener Karmulden zu höheren, älteren Stockwerken ohne eine gewisse Willkür kaum möglich ist; doch erscheint mir in dieser Hinsicht jede Verallgemeinerung unzulässig: ich erkenne die Möglichkeit der Zusammensetzung einer Kartreppe aus Resten verschiedener Talstände durchaus an.

Die Stockwerktheorie kann also oft die großen Züge der Kartreppe erklären, sie versagt aber, gilt es die mangelnde Einheitlichkeit der Karstufung zu verstehen, und gerade diesen Mangel an Übereinstimmung bezeichnete ich als ein wesentliches Merkmal der Kartreppe. Sie versagt gleicherweise angesichts der großen Zahl von übereinanderliegenden Karstufen, denn in Anklang an Richter müßte man sagen: Man wird für die zahlreichen, in kurzer Entfernung folgenden Karstufen doch nicht ebensoviele verschiedene Stockwerke annehmen wollen. Die Konstruktion einer vielgliedrigen Stockwerksfolge lediglich auf Grund der Karstufen wäre ein gar hinfälliges und, infolge der wechselnden Stufenzahl, auch ein an Widersprüchen reiches Gebäude: größte Vorsicht muß bei dieser Methode beobachtet werden.

3. Fast unbeachtet ist die von Lehmann im Adamello beobachtete Erscheinung der „Mündungskare“ (2, S. 30 und 50f.) geblieben, obwohl gerade aus ihr sich reicher Nutzen zur Bewertung der Kare, ganz besonders aber zum Verständnis der Kartreppe ziehen läßt. Der Gedankengang ist in freier Wiedergabe kurz folgender: Bei „getrenntem“ (d. h. in mehrere Wasseradern geteiltem) Abfluß, wozu die Disposition ganz allgemein im Flachgelände (Stromverwilderung), im

besonderen auf der Sohle glazialer Hängetäler, in Karböden oder auf Schulterflächen gegeben ist, kommt es im unterhalb anschließenden Steilgelände, wo sich die getrennten Wasser vereinen, zur Bildung eines Sammeltrichters, der, genau wie die Ursprungskare aus Quelltrichtern, durch eine folgende Vereisung zu einem Kar, in diesem Falle Durchgangskar, umgestaltet wird. Vollzieht sich dieser Wechsel fluviatiler und glazialer Einwirkung mehrmals, so ist die Möglichkeit zur Entstehung einer Kartreppe gegeben. Es leuchtet ein, daß diese Erklärung keine sonderliche Übereinstimmung in verschiedenen Karen erheischt und damit einer Hauptschwierigkeit der Stockwerktheorie aus dem Wege geht. Der Mündungskartheorie scheint uns eine allgemeine Bedeutung zuzukommen, besonders wenn man bedenkt, daß die gleichen Voraussetzungen wie an Hängemündungen oder am Trogrand (für welche Fälle Lehmann seine Anschauungen ausführt) bei der Annahme eines zufolge des Stockwerkbaues großgestuften Kares in der Rückwand der jeweils tieferen Karstaffel gegeben sind. Es kann also der anfänglich einfache Stufenbau einer Stockwerkterappe durch die Entstehung von „Mündungskaren“ (in diesen Fällen ist der Name nicht mehr ganz treffend) weitgehendst umgewandelt, ja unkenntlich werden.

All diese Erklärungen betreffen ausgesprochene Querstufen, für schräg ansteigende Stufen sind sie nicht ohne weiteres voll entsprechend, und ist man erst einmal auf das schräge Ansteigen aufmerksam geworden und hat sich wieder zur Unvoreingenommenheit durchgerungen, nicht überall horizontale Zusammenhänge zu suchen, so wird man gewahr, wie außerordentlich groß die Zahl der schrägen Karstufen ist; man mache den Versuch und schaue daraufhin irgendein alpines Bilderwerk durch. Ich wurde auf diese Eigentümlichkeit aufmerksam, als ich vom Gamskogel bei Längenfeld im Ötztal die Kare im rechten Sulztalgehänge, Salchenkar, Grieskar, Rotkar, betrachtete (vgl. Karte des D. Ö. A. V. Ötztal-Stubei, Bl. II und Tafel II, Bild 1); es fällt auf, daß der annähernd horizontalen Stufe im Salchenkar in 2500 bis 2570 m im Grieskar eine von 2550 auf etwa 2400 m gegen Osten absteigende Stufe gleichzusetzen wäre, im Rotkar aber gar die Stufen durch einen rudimentären, aus dem Gipfelbau des Breiten Grieskogels entspringenden, schräg gegen SO absteigenden Rücken, der eine hohe Mulde in rund 2700 m von der Hauptmulde trennt, vertreten werden; stutzig geworden, bemerkt man, daß auch die Stufe im Grieskar sich deutlich als die Fortsetzung des das Grieskar vom Salchenkar trennenden Grates darstellt und auch die „horizontale“ Stufe im Salchenkar, wenn auch nicht so zwingend, als die Fortsetzung einer Gehängerippe aufzufassen ist. Betrachtet man den Umfang der Kare, so sieht man, besonders beim Grieskar, in der Zerlappung noch deutlich die fluviatile Urform nachklingen. Wir erkennen also an diesen Beispielen Karstufen als durch Gratspornrudimente bedingt. Petrographische Einflüsse spielen in diesem Falle nicht mit.

Ähnlich, aber noch viel krasser, liegen die Verhältnisse im obersten Hauertal, das vom Westen her bei Längenfeld ins Ötztal mündet (vgl. Bl. I und II d. A. V. Karte und Tafel I, Bild 2). Zur Karmulde in 2330 m, die der Hauersee ziert, zieht vom Hauerferner ein steiler, anstehender, aber stark verschütteter Stufenhang nieder, der gekrönt wird von den Grattürmen 2730. Diese Grattürme sind offenkundig Reste eines aus der Nordwestflanke des Falderkogels entspringenden

Grates, der über P. 2730 und die Feuerköpfe in den Hohen-Ecken-Kamm verlief. Die Hauer-Ferner-Mulde ist also eigentlich der oberste Teil des Lehnbachtals und wurde erst durch teilweise Niederlegung des genannten Grates dem Hauertal angegliedert; das früher mit dem Lehnbachtal verbindende Talstück im W der Feuerköpfe ist heute durch Sturzblöcke und Firnmoränen verlegt. Die Stufe zwischen Hauersee und Hauerferner entpuppt sich deutlich als Gratreststufe. Auch hier ist nicht ersichtlich, daß die Gesteinsverhältnisse einen in irgend einer Richtung fördernden oder hemmenden Einfluß ausgeübt hätten. Wo aber Härteunterschiede mitwirken, kommt der Gratrest- oder Spornrestcharakter vieler Karstufen zu ganz besonderer Ausprägung. Dies zeigt z. B. das Milchkar, das dem Gamskogel bei Längenfeld im NO eingelagert ist. Über den verflächungsartigen Karboden knapp über der Waldgrenze in 2080 m steigt von 2100 bis 2300 m eine in ihrem Westflügel anstehende und etwas höhere, in ihrem Ostflügel, der kein Anstehendes aufgeschlossen zeigt, etwas niederere Stufe zu einem Boden in 2300 m auf. Auch im weiteren Anstieg ist das Kar reich gestuft, und zwar erscheinen die Stufen als niedergeschliffene Ausläufe von Gehängerippen, Wandpfeilern oder auch untergeordneten Rücken, die bald von der linken, bald von der rechten Begrenzung ins Kar vorspringen; dementsprechend erniedrigen sich die Stufen gegen O bzw. gegen W; in ihrem niedereren Flügel sind sie meist verschüttet. Die genannten Pfeiler und Rippen sind zum guten Teil petrographisch bedingt, da sie jedoch nahezu quer auf die Bewegungsrichtung des Eises stehen, fällt es schwer, sie durch selektive Eiserosion zu erklären; es hat viel mehr für sich, sie als wohl präglaziale, vielleicht interglaziale Rücken oder Kämmen in einem kleinen, subsequents fluviatilen System aufzufassen. Eine solche Ausprägung der fluviatilen Vorform in der Zerlappung des Karumfangs und in den „Spornstufen“ (wie ich kurz in Ermangelung eines besseren Ausdruckes sagen will) läßt sich sehr häufig mit großer Wahrscheinlichkeit aus dem bloßen Anblick entnehmen; man vergleiche z. B. die vorzüglichen Karbilder bei Fels (28, Tafel IV, Nr. 6, IV 7, V 9, X 16 usw.).

Da bei einem wenig eingetieften Tale die Seitentälchen spitzwinkelig einmünden, bei starker Eintiefung mit Ausbildung eines dem Tale eigenen Gehänges die Seitentälchen aber immer mehr im rechten Winkel einmünden und da die Spornstufen nun zumeist eine ziemlich rechtwinkelige Einmündung anzeigen, komme ich dazu, als Vorformen für solche etwas talartige Kare nicht seichte Mulden anzunehmen, sondern stark eingeschnittene, grabenartige Tälchen und Tälchensysteme, wie wir sie etwa im steirischen Randgebirge oder im deutschen Mittelgebirge finden können.

Da sich solche Gräben sehr wesentlich von den heutigen Karen in der Form unterscheiden, muß das Eis bedeutende Arbeit geleistet haben. Ich bin auch noch schuldig, den Mechanismus der Umwandlung von Gehängespornen und Rücken in Spornstufen dem Verständnis näher zu bringen, denn wir haben zwar gesehen, daß in einzelnen Fällen die Erklärung von Karstufen als Spornausläufer oder Spornreste geradezu das Ei des Columbus bedeutet, in vielen anderen Fällen ist diese Umwandlung aber nicht so leicht einzusehen. Ich muß vorausschicken, daß ich hierin noch nicht zu einer endgültigen und vollständigen Auffassung gekommen bin, es wird dazu noch vieler Beobachtung und wohl auch der einen

oder anderen Revision bedürfen. Immerhin bin ich in der Lage, einiges zu diesem Umwandlungsprozeß zu bemerken.

Kommt der als Vorform angenommene Graben oder das angenommene Tälchensystem in die Firnregion, so wird sich zunächst in den Hohlformen Firn ansammeln, die die einzelnen Seitentälchen trennenden Rücken werden daraus noch emporragen. Da der Firn die fluviatile, darum vielgliederte Hohlform erfüllt, ist der Randkluftverwitterung eine Angriffslinie gegeben, die ein Vielfaches von der in einer Hohlform mit einfachen Umrissen ist; die Randkluftverwitterung wird daher auch viel mehr Arbeit zu leisten vermögen, wird hauptsächlich das enge fluviatile Tälchennetz ausweiten; durch das mit der Ausweitung verbundene Rückfließen der Taltrennungssporne werden Becken entstehen, und zwar um so rascher, je spitzwinklicher sich die einzelnen Tälchen vereinigen. So wird die Entstehung der „Konfluenz“-becken eher verständlich, denn allein durch die gesteigerte Menge des Erosionsmittels von der Talvereinigung an könnten nur von der Einmündungsstelle talaus ständig fortbestehende Talweitungen zur Ausbildung kommen.

Sammeln sich mit sinkender Schneegrenze weitere Firnmassen im Graben und seinem Einzugsgebiet an, so daß schließlich auch die Trennungssporne untertauchen, eine „Inlandvereisung im kleinen“ innerhalb jedes Grabeneinzugsgebietes entsteht, so werden die basalen Eislagen noch den fluviatilen Linien folgen, durch Lateralerosion das Talnetz fürder ausweiten, die Becken werden größere Ausmaße annehmen, zugleich werden aber die höheren Eislagen, die in der Hauptgefällsrichtung, also zumeist quer auf die Trennungssporne der Seitentälchen, fließen, einerseits flächenhaft am Niederschleifen der Trennungssporne arbeiten, andererseits aber beim Niederstürzen ins nächste tiefere Seitentälchen zufolge Krümmungsdruckes stark erodieren (vgl. oben S. 23f.). Es werden also die Trennungssporne mit der Zeit mehr oder minder niedergeschliffen werden, an ihrer Stelle werden jedoch Stufenkronen verbleiben. Hiemit kann die Umwandlung von Spornen u. dgl. in Spornstufen einigermaßen einleuchten. Ich bin der bestimmten Ansicht, daß ein großer Teil der Karstufen in diesem Sinne seine einfachste Erklärung findet.

Es sei hier noch ganz kurz die Frage der Karrücktiefung berührt. Die Beobachtung im Gelände zeigte mir, und zu entsprechenden Ergebnissen kommen auch Creutzberg und Fels, daß sich Rücktiefungen vornehmlich in Karen mit hoher Umrahmung (vgl. Thalleitkar, erwähnt oben S. 29) und in Durchgangskaren finden. Nach den Ausführungen im ersten Abschnitt über den Krümmungsdruck begreift man dies sehr wohl und es erübrigt sich eine nochmalige Darlegung. Jedenfalls kommt der Reliefübertreibung durch Krümmungsdruck eine sehr bedeutende Rolle auch für die Entstehung der Kartrepe zu.

War jetzt in erster Linie nicht von typischen Kesselkaren, auch nicht von den schon zu Hochfluren überleitenden Karformen die Rede, sondern von den in den Alpen zumeist die Überzahl bildenden tal- bis muldenartigen, häufig getrepten Karen, so tragen die vorgebrachten Anschauungen doch auch zum Verständnis der (ja nicht grundsätzlich) anderen Karformen bei. Die Großkare und Hochfluren zeigen fast immer ein reich gegliedertes, sich heute noch als fluviatil angelegt verratendes Mulden- und Rinnennetz und mannigfache Über-

gangsformen von Trennungsrücken und Spornen zu Stufen können beobachtet werden; als Beispiele aus dem Ötztal seien die Hochfluren im Tumpental oder im Leierstal (vgl. Tafel II, Bild 3; hier infolge von Subsequenz sehr reich gegliedert), die beide ins Umhausener Becken münden (vgl. Karte D. Ö. A. V., Ötztal-Stubai, Bl. I), genannt. Ähnliche Fälle wären u. a. das Marxenkar oder das Große Ödkar im Karwendel (vgl. 28, S. 11 und 16), das Brunnkar in der Ankogelgruppe (vgl. 23, S. 20), Wilde Krimml und Toralm in den Kitzbüheler Alpen (vgl. 34, S. 32 und 46). Das Mulden- und Rinnennetz muß nicht (vielleicht nur in den großen Zügen) rein präglazial bestimmt sein, eine interglaziale und besonders subglaziale Beeinflussung ist durchaus wahrscheinlich. Aus dem Verlauf der Rücken- und Trennungssporne läßt sich mit einiger Wahrscheinlichkeit ein etwas flacheres Ausgangsrelief erschließen; das ist auch sehr begreiflich, denn hochflurartige und Großkare scheinen zumeist den größeren Seitentälern oder gar den Enden des Haupttales zu entsprechen. Doch war die Ausgangsform auch dieser extremen Karformen sicher keine flache, der heutigen Karform gleichende Mulde.

Betrachtet man anderseits die typischen Kare, so zeigt sich, daß auch ihr Auftreten sich gut in den Rahmen der vorgebrachten Auffassung fügt. Im Schrifttum findet sich der Hinweis (vgl. 23, 35), daß die typischen Kare sich häufig an die innersten Winkel der Großkare und Talkare knüpfen; begreiflich, denn wo anders als an den Enden der den Großkaren zugrundeliegenden fluvialen Einzugsgebiete sollten sich die Quelltrichter, die die geeignetste Ausgangsform der typischen Kare sind, finden; aber natürlich können solche Quelltrichter, wenn auch seltener, auch im Haupttalgehänge selbst bestanden und hier die Ausbildung typischer Kare vorbereitet haben (z. B. Thalleitkar).

Wir sehen also den verschiedenen Karformen verschiedene, grundsätzlich freilich gleiche Ausgangsformen zugrundeliegen, in denen sich auch die glaziale Umgestaltung (Randkluff- und Bergschrundwirkung, ausgleichende und verschärfende Tiefen- und Seitenerosion) natürlich nicht in genau der gleichen Weise vollziehen konnte: so entspricht der Formenübergangsreihe von Hochflur zu Trichterkar eine genetische Übergangsreihe. Festzuhalten jedoch ist, daß die Kare ein „eigener Formentypus“ (vgl. 24) sind, daß „durch die Vergletscherung etwas anderes entstanden ist“ (24, S. 215) als die Ausgangsform war, daß „in der nivalen Phase sich der entscheidende Vorgang der Karbildung vollzieht“ (vgl. 36, S. 286), daß „la cause première et déterminante de la formation du cirque est donc bien le glacier“ (22, S. 15). So bedeutungslos für die Kare die Lage an einer Schneegrenze ist, so bedeutungsvoll ist die Lage in der Schneeregion.

### **Angeführtes Schrifttum.**

1. Lehmann O., Die Oberflächengestaltung der österreichischen Alpen. In „Die österreichischen Alpen“, herausg. von Leitmayer, Leipzig-Wien 1928, S. 84ff.
2. Lehmann O., Die Bodenformen der Adamellogruppe und ihre Stellung in der alpinen Morphologie. Abhandl. d. Geogr. Ges. Wien 1920.
3. Rüttimeyer L., Über Tal- und Seebildung. Basel 1869.
4. Penck-Brückner, Die Alpen im Eiszeitalter. Leipzig 1901/09.
5. Martonne E. de, L'érosion glaciaire et la formation des vallées alpines. Ann. de Géogr. 1910, S. 289ff.



Bild 1. Vgl. S. 29; Bildmitte Thalleitspitze mit dem eingelagerten Thalleitkar (2862), rechte Bildhälfte Großkar des Eisferners, linke Bildhälfte Eckflur 2784. (Aufgen. von der Breslauer Hütte, 18. 8. 1930.)



Bild 2. Vgl. S. 37; Blick von P. 2100 zwischen Lehnbach- und Hauertal ins innerste Hauerthal (links) und Lehnbachtal (rechts); die Grattürme 2730 heben sich deutlich gegen den Hauer-Ferner ab; gerade in ihrer Fallinie die Hauersee-Hütte 2331 m, am Rande der vom Hauersee eingenommenen Karmulde; rechts von den Grattürmen 2730, links der Fallinie des Gipfels des Loibiskogels (Bildmitte) die Feuerköpfe, von denen der Taltrennungsrücken gegen den Beschauer zieht. Auch das Wurmeskar (das erste rechts vom Loibiskogel) zeigt Beispiele für Spornstufen. (Aufgen. 17. 8. 1932.)

Bild 1. Vgl. S. 37; Blick vom Gamskogel bei Längenfeld gegen Breiten Grieskogel (Bildmitte) und Winnebachtal (rechte Bildhälfte); linker Bildrand die fluviatil gefurchten Steilhänge des Hörndle, gegen rechts anschließend Salchenkar, dann Grieskar, Rotkar, die alle durch Wildbacheinrisse vom Tale her angegriffen werden. (Aufgenommen 16. 8. 1932.)



Bild 3. Vgl. S. 40; der Hintergrund des Leierstales, links der Fundusfeiler. Die Hochfluren erhalten ihre Gliederung durch ein sehr verwickeltes, subsequentes Tälchenetz; mannigfache Übergangsformen von Rücken und Spornen zu Spornstufen. (Aufgen. vom Weg Lehnerjöchel—Wettersee, 18. 8. 1932.)



Bild 2. Hochfluren im S des Alkuser Sees (linkes Iseltalgehänge; vgl. neue österr. Sp.-K. 1:50.000 Bl. Lienz) gegen die Schleinitz. Die Kleinformen in der Gipfelfalllinie geben ein prächtiges Beispiel einer durch Spornstufen geschaffenen Kartrepp. Ebenso ist die von links oben nach rechts unten das Bild durchziehende Stufe augenscheinlich eine Spornstufe. (Phot. Dr. Bauer, 24. 7. 1931.)

6. Martonne E. de, Quelques données nouvelles sur la jeunesse du relief préglaciaire dans les Alpes. Cvijič-Festschr., Belgrad 1924, S. 121ff.
7. Lautensach H., Die Übertiefung des Tessingebietes. Leipzig-Berlin 1912.
8. Burchard A., Neue Erkenntnisse zum Stufenbau der Alpentäler. Pet. M. 1923, S. 158ff., 210ff.
9. Henkel L., Bemerkungen über Gletschererosion. Pet. M. 1925, S. 108.
10. Burchard A., Formenkundliche Untersuchungen in den nordwestlichen Öztaler Alpen. Forsch. z. deutsch. Landes- u. Volkskd., XXV, II, 2, Stuttgart 1927.
11. Machatschek Fr., Zur Morphologie der Schweizer Alpen. Sonderband d. Zeitschr. d. Ges. f. Erdkd., Berlin 1928, S. 232ff.
12. Machatschek Fr., Die Arbeit des fließenden Eises. In: Supan, Grundz. d. physischen Erdkd., herausg. von Obst, Berlin-Leipzig 1930, Bd. II/1, S. 213ff.
13. Burchard A., Erwiderung auf Henkel. Pet. M. 1925, S. 108.
14. Brunhes J., Sur une explication nouvelle du surcreusement glaciaire. C. r. d. l'Ac. des Sc. Paris 5 juin 1906.
15. Richter F., Geomorphologische Untersuchungen in den Hochalpen. Pet. M. Erg.-H. 132. Gotha 1900.
16. Distel L., Die Formen alpiner Hochtäler, insbesondere im Gebiet der Hohen Tauern. Mitt. d. Geogr. Ges. München 1912.
17. Drygalski F., Die Entstehung der Trogtäler zur Eiszeit. Pet. M. 1912, II.
18. Mayer R., Über Erosion. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien 1928, S. 299ff.
19. Ampferer O., Studien über die Inntalterrasse. Jahrb. d. Geol. Reichsanst. Wien 1904, S. 91ff.
20. Ampferer O., Über die Entstehung der Hochgebirgsformen in den Ostalpen. Zeitschr. d. D. Ö. A. V. 1915, S. 72ff.
21. Machatschek Fr., Die Gletscher. In: Supan, Grundzüge der physischen Erdkunde, herausg. von Obst, Berlin-Leipzig 1927, Bd. I, S. 437ff.
22. Martonne E. de, Sur la formation des cirques. Ann. d. Géogr. Paris 1901, S. 10ff.
23. Creutzburg N., Die Formen der Eiszeit im Ankogelgebiet. Ostalp. Formstud. II, 1. Berlin 1921.
24. Aigner A., Das Karproblem und seine Bedeutung für die ostalpine Geomorphologie. Zeitschr. f. Geomorph. 1930, S. 201ff.
25. Partsch J., Die Hohe Tatra zur Eiszeit. Leipzig 1923.
26. Brückner E., Referat über Bowman: The studies of Southern Peru, New York 1916; in Zeitschr. f. Glkd. 1921/22, S. 57ff.
27. Wolf H., Entwicklungsgänge morphologischer Forschung in den Alpen. Drygalski-Festschrift, München-Berlin 1925, S. 204ff.
28. Fels E., Das Problem der Karbildung in den Ostalpen. Pet. M. Erg.-H. 202, Gotha 1929.
29. Levy Fr., Quartäre Formenentwicklung der Schlierseer Berge und ihrer Nachbarschaft. Ostalp. Formstud. I, 2. Berlin 1922.
30. Distel L., Randklufft und Bergschlund. Drygalski-Festschrift, München-Berlin, 1925, S. 225ff.
31. Martonne E. de, Mission en Autriche (1911). E. morph. des Alpes or. et des Karp. sept. Bull. d. g. histor. et descr. Paris 1911, S. 387ff.
32. Worm G., Kare und Kartreppen in ihrer Abhängigkeit von voreiszeitlichen Reliefresten. Zeitschr. f. Glkd. 1926/27, S. 277ff.
33. Börner H., Vergleichende Talgeschichte von Montafon und Paznaun. Zeitschr. f. Geomorph. 1932, S. 109ff.
34. Rinaldini B., Die Kitzbüheler Alpen. Ostalp. Formstud. II, 3. Berlin 1923.
35. Aigner A., Vorzeitformen in den ostalpinen Zentralketten. Sieger-Festschrift, Wien 1924, S. 22ff.
36. Worm G., Kare und Schneegrenze. Zeitschr. f. Glkd. 1926, S. 285ff.