

Gletscherform und Zungengröße.

Von Sieghard Morawetz.

Die Beziehungen zwischen Geländeform und Gletschertypen sind in den Alpen recht eng. In den Namen Plateau-, Tal-, Kar-, Hang-, Schluchtgletscher spiegelt sich diese Abhängigkeit deutlich wider. Erreicht die Vergletscherung dagegen ganz große Ausmaße, so vermag sie die Reliefformen immer mehr zu überwältigen, um endlich fast unabhängig davon aus sich selbst heraus die Eisoberflächenform zu bestimmen. In den Gebieten des Inlandeises, in Grönland¹ und Antarktika, ist dieser Fall bei Eisdicken von 2000 m und vielleicht mehr weitgehend eingetreten. Aber selbst Gletscher von alpinem Ausmaß weisen schon Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern auf², und am Konkordiaplatz hat die seismische Dickenmessung für den Aletschgletscher³ fast 800 m Maximalwert ergeben. Bei solchen Beträgen können aber in den Tälern kleine Stufen ganz verhüllt und auch größere an der Gletscheroberfläche nur abgeschwächt wiederholt werden. Umgekehrt vermag sich ein Eisstrom, der aus mehreren Seitenarmen oder Firnfeldmulden gespeist wird, an der Vereinigungsstelle so aufzustauen, daß er eine mäßig hohe Stufe bedeutend verstärkt abbildet oder eine solche sogar überhaupt nur aus Eis allein erzeugt⁴. Neben einer Reliefüberwältigung kann das Gegenteil, eine Reliefvortäuschung, stattfinden.

Die Form des Firnfeldes wie auch die der Zunge hängt nun einmal von der Geländegestaltung und dann weiter von den Eisdicken und Eisauftaubedingungen ab. Starke Eismächtigkeiten vermögen im Firnfeld Wannen, Rundhöcker, Stufungen, kleine Seitensporne zu verdecken und eine einheitliche Firnoberfläche zu erzeugen und so unter Umständen ein unegliedertes Firnfeld-, Großkar-, Talschlußgebiet dem Beschauer vorzutäuschen. Mächtige Zungen wieder weisen vor allem in Tälern neben einer Verhüllung von Wannen, Rundhöckern und Stufungen eine recht beträchtliche Oberflächenbreite auf, die für die eigentliche Talsohle meist bedeutend geringer zu veranschlagen ist.

¹ H. K. E. K r u e g e r, Gesteinskörper und Inlandeis Grönlands in ihrer gegenseitigen Beziehung und Auswirkung. Zeitschr. f. Gletscherk., 17. Bd. 1929, S. 1—33.

² H. H e ß, Der Hintereisferner 1893—1922. Zeitschr. f. Gletscherk., 13. Bd. 1924, S. 145. — H. M o t h e s und B. B r o c k a m p, Seismische Untersuchungen am Pasterzenkees. Zeitschr. f. Gletscherk., 19. Bd. 1931, S. 1—18.

³ H. M o t h e s, Neue Ergebnisse der Eisseismik. Zeitschr. f. Geophysik, 5. Bd., Heft 3/4.

⁴ S. M o r a w e t z, Die Bedeutung der Oberflächenformen für die Gletscherentwicklung. Pet. Mitt. 1936, S. 104.

Nur dort, wo eine Oberflächenform, z. B. ein gleichmäßig geneigter Hang, von Eis und Firn bedeckt wird, muß auch die Eisoberfläche die gleiche Form aufweisen. Einzig die Neigung der Gletscheroberfläche kann von der des Untergrundes um Weniges abweichen.

Je nach den Untergrundformen des Firnfeldes und der Zunge und je nach den Dicken und den dadurch mitgeschaffenen Oberflächenformen des Gletschers sind — von Ernährung und Ablation abhängig — für die Gletscherform und Zungengröße eine Anzahl von Kombinationen möglich. Hier sei einmal die Frage nach der Größe des Nährgebietes und der Zungenneigung gestellt. Zu diesem Zwecke wurden 34 Gletscher Westalpen und 36 der Ostalpen, die Heß⁵ schon in seiner Gletscherkunde anführt, untersucht.

Tabelle 1.⁶

Westalpen 34 Gletscher		Westalpen 34 Gletscher	
		Zungenneigung	
		nach Heß	neue Berechnung
N : Z = über 3 : 1 bei 18 Gl.	N : Z = 4·7 : 1	27°	22°
N : Z = unter 3 : 1 „ 16 „	N : Z = 2 : 1	16°	11°
Ostalpen 36 Gletscher		Ostalpen 36 Gletscher	
		Zungenneigung	
		nach Heß	neue Berechnung
N : Z = über 3 : 1 bei 18 Gl.	N : Z = 3·7 : 1	23°	20°
N : Z = unter 3 : 1 „ 18 „	N : Z = 2·4 : 1	17°	9—11°

Aus der Tabelle geht klar hervor, daß fast genau die eine Hälfte der Gletscher über, die andere unter dem Verhältnis $N : Z = 3 : 1$ bleiben. Die Abweichung von dem Verhältnis $N : Z = 3 : 1$ beträgt jedoch nicht nur wenige Zehntel, die leicht zufällig sein können, sondern wird ganz bedeutend. Dort, wo das Nährgebiet groß und die Zunge klein ist, erreicht die Zungenneigung Höchstwerte, die weit über jenen Werten, die die Gletscher mit relativ großer Zunge und kleinem Firnfeld aufweisen, liegen. Es macht dabei im Prinzip keinen Unterschied, ob man die Höchstwerte von Heß nimmt oder die neueren Durchschnittswerte. Beide Zahlen zeigen das gleiche.

Vergleicht man die untersuchten 70 Gletscher untereinander nach Firnfeld-, Zungengröße, Zungenneigung, Firnfeld- und Zungenform, so drängen sich einem drei Einteilungen auf: 1. großes Firnfeld, kleine Zunge und starke Zungenneigung; 2. kleines Firnfeld, große Zunge und schwache Zungenneigung; 3. kleines Firnfeld, große Zunge und starke

⁵ H. Heß, Die Gletscher, S. 72, 84. Braunschweig 1904.

⁶ Die linke Reihe gibt die Anzahl der Gletscher an, deren Zehrgebiet über oder unter dem Verhältnis $3 : 1$ liegt, die rechte Reihe bringt für die Gesamtzahl der Gletscher das Verhältnis von $N : Z$ und die Zungenneigung nach Heß und nach neuer Durchrechnung.

Zungenneigung. Alle Werte sind Vergleichswerte, und es sagen die Bezeichnungen „kleines Firnfeld“ oder „große Zunge“ über die absoluten Größen nichts aus.

Tabelle 2.

N a m e	Großes Firnfeld		Kleine Zunge N : Z	Starke Zungenneigung	
	Exposition	Größe		nach Heß	neue Berechnung
Giétroz	W	6·8	10 : 1	26°	23°
Allalin	SO	11·4	7 : 1	33°	25°
Fee	SO	20·8	5·6 : 1	30°	18°
Bies	SO	5·7	5·4 : 1	43°	35°
Ob. Grindelwald	W	10·6	4·8 : 1	37°	20°
Palü	O	7·2	4·6 : 1	—	18°
Trient	N	7·2	3·7 : 1	34°	25°
Ved. la Mare	O	7·2	6·0 : 1	40°	23°
Mandrone	N	13·7	5·7 : 1	24°	21°
Mittelberg	N	16·3	4·2 : 1	21°	14°
Übeltal	O—SO	11·9	4·1 : 1	30°	25°
Lobbia	N	6·3	4·0 : 1	42°	22°
Langen	N—NW	16·4	4·0 : 1	33°	22°
Gepatsch	N—NW	15·5	2·8 : 1	15°	15°

Gletscher verschiedenster Größe gehören diesem Typus an. Neben den angeführten wäre noch eine große Anzahl mittlerer Kargletscher, die eine steile Zunge über die Schwelle hinabsenden, hier einzureihen. Von den Expositionen sind fast alle Richtungen vertreten. Bedenkt man, daß in unseren Breiten Gletscher an und für sich in N- und O-Lage häufiger vorkommen, so darf man von keiner besonders auffälligen N- und NO-Exposition bei diesen Gletschern sprechen. Bei einer kleinen Zunge würde man am ehesten häufige S- und SW-Lagen für sie vermuten. Mögen sich die Verhältnisse von Nähr- und Zehrgebiet nach dieser oder jener Berechnung etwas verschieben, immer bleibt das große Firngebiet noch erhalten. Nach den Ablationsregeln vermag eine kleine Zunge nur dann, wenn sie schnell in die Tiefe dringt, das, was im großen Firnfeld an Zuwachs anfällt, abzugeben. In den Alpen nimmt unter der Schneegrenze die Ablation pro 100 m Höhenabnahme um rund 1 m zu. Die starken Neigungen der Zungen an und für sich sind durch das Gelände bedingt. Der Stockwerkbau der Alpen wirkt sich günstig aus. An Talstufen, Talschlußstufen, Karschwellen, Trogwänden können bei Talgletschern so hohe Neigungen, sieht man von ungegliederten Seitenflanken ab, erlangt werden. Diese kleinen, steilen Zungen vermögen das Gelände nur wenig zu verhüllen. Die Neigung der Zunge paßt sich eng an die des Hanges an. Für Stauwirkungen fehlen meist die Bedingungen. Im Firnfeld dagegen, das oft muldenförmig ausladet oder weite Kar- und Trogplatten bedeckt, kann neben einer Verhüllung der Formen ein Anstau von Firn und Eis erfolgen; ja, er muß sogar ein-

treten, wenn bei der Flachheit des Geländes das Eis erst bei größerer Mächtigkeit seine Trägheit überwältigt und abfließt. Typische Talgletscher fehlen dieser Gletscherart fast vollkommen. Ein hohes, flaches Niveau und ein Steilabfall in das tiefere Stockwerk stellen die geeignetsten Vorformen dar. Ist das Firnfeld absolut groß und muß darum die Zunge auch eine gewisse Stattlichkeit haben, kann es einen „gerade noch Talgletscher“ geben. Selbst die beiden großen Ötztaler Gletscher, Gepatsch- und Mittelbergferner, passen sich diesem „gerade noch Talgletscher“-Typ ein.

Tabelle 3.

Name	Kleines Firnfeld		Große Zunge N : Z	Geringe Zungenneigung	
	Exposition	Größe		nach Heß	neue Berechnung
Zmutt . . .	O	24	1 : 1	10°	6°
Unteraar	O	39	1·5 : 1	12°	5—7°
Oberaar	O	8	1·8 : 1	14°	7—9°
Aletsch	S	115	2·0 : 1	7°	5—7°
Langtaler	NW	5·7	1·8 : 1	10°	5°
Hintereis	NO	13·8	2·2 : 1	8°	5—6°
Pasterze	SO	24·5	2·6 : 1	13°	3—6°
Hochjoch	N	11·9	2·7 : 1	12°	7°

Hierher gehören die typischen Talgletscher, gleich, ob sie aus einem weiten Firnfeld oder mehreren Armen gespeist werden. Es sind z. T. die ganz großen Gletscher der Alpen, aber auch viele mittelgroße Talgletscher müssen da ihre Einordnung erfahren. Vereinzelt treten noch kleine Talgletscher auf, aller kleinste fehlen. Wie stark die Firnfeldgröße und die Zungenneigung zurückbleibt, ergibt ohne weiteres der Vergleich mit Tab. 2. Geht man über die gewählten acht Beispiele hinaus, so trifft man neben Expositionen aller Windrichtungen doch auffallend oft S-Expositionen, ein Umstand, der bei der Zungengröße besonders auffallen muß. Bei N- oder O-Exposition wäre eine so große Zunge leichter verständlich. Hier liegt in der geringen Zungenneigung, bzw. im mäßigen Gefälle der Talsohlen, die erst allmählich den Gletscher in die Tiefe und Abschmelzregion gelangen lassen, die Hauptursache.

Tabelle 4.

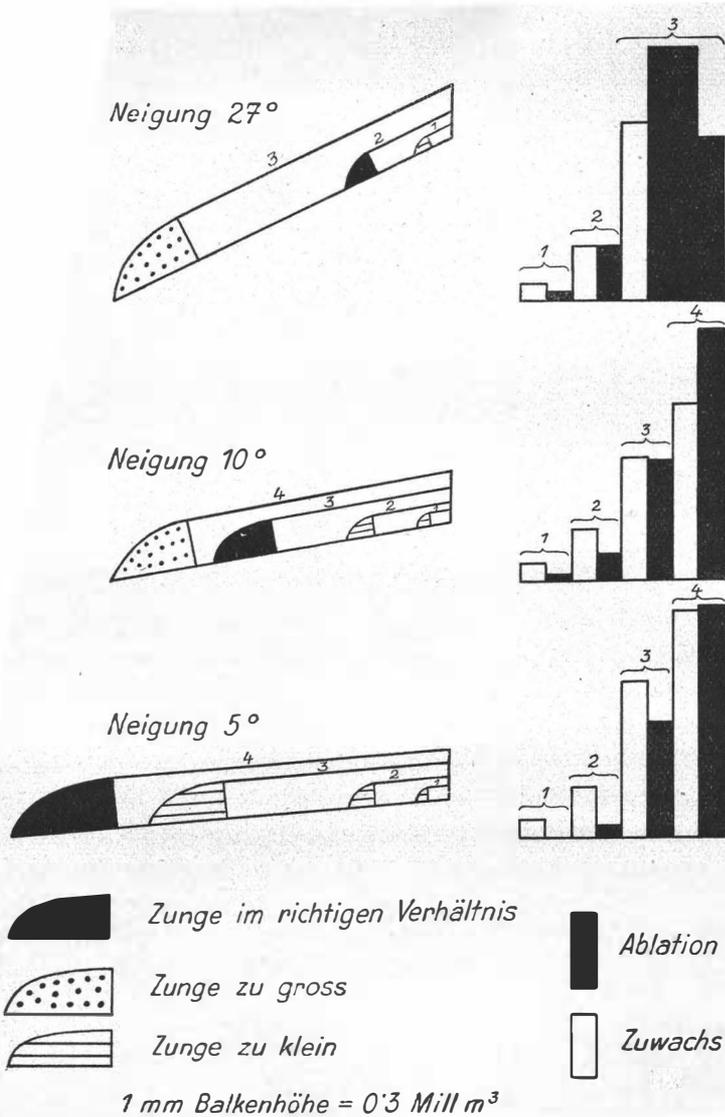
Name	Kleines Firnfeld		Große Zunge N : Z	Starke Zungenneigung		
	Exposition	Größe		nach Heß	neue Berechnung	
Arolla . . .	N	19·3	1·8 : 1	19°	10°	2 Arme
Zinal . .	N	18·3	2·0 : 1	22°	12°	3 Arme
Moiry . . .	N	8·0	2·0 : 1	25°	10°	gestuft
Biferten . .	N		2·0 : 1		22°	"
Brunni . . .	N		2·0 : 1		18°	"
Gauli	N	21·4	2·2 : 1	21°	11°	mehrere Mulden
Ferpècle . .	N	22·3	2·3 : 1	22°	12°	2 Arme
Schlaten	O	11·8	2·5 : 1		15—20°	gestuft
Steinen . . .	N	12·3	3·7 : 1	30°	13°	"

Es sind mittelgroße bis große Gletscher, selten kleine, die dieser Kategorie angehören. Fast reine N-Exposition überwiegt. Das Verhältnis von Nähr- zu Zehrgebiet weicht von dem in Tab. 3 nicht viel ab, die Neigung der Zunge dagegen weist annähernd die doppelten Beträge auf. Der Gestalt nach hat man es mit Talgletschern und „gerade noch Talgletschern“ zu tun. Am auffälligsten ist jedoch die Form der Zunge; herrschen bei Tab. 2 gleichmäßig steile Zungenlappen, bei Tab. 3 ziemlich gleichmäßig flachgeneigte Talzungen fast ausschließlich vor, so zeigen jetzt die Zungen Treppung und vielfach auch Zusammensetzung aus mehreren Zungenarmen. Steilstücke wechseln mit flacheren Absätzen ab. Ein Blick auf die entsprechenden Schweizer Kartenblätter 1 : 50.000 zeigt deutlich all diese Formen⁷. Diese Gliederung in Absätze und Zusammensetzung aus mehreren Armen ist neben der günstigen Exposition die Hauptursache für die relative Zungengröße.

Einem allfälligen Einwand, daß es sich bei den als Beispiele angeführten 31 Gletschern um Zufallsordnungen unter mehreren hundert Alpengletschern handelt, sei zur Stützung der gegebenen Gliederung folgende theoretische Überlegung beigefügt: Man denke sich einen etwa 25 bis 30° geneigten, gleichförmigen Hanggletscher von (Fall 1) rund 1·3 km Länge, (Fall 2) 4 km Länge und (Fall 3) 13·3 km Länge und nehme weiter an, daß die Firnlinie den Gletscher im Verhältnis 1 : 3 teilt. Der Zuwachs im Firnfeld soll pro Quadratmeter 0·7 m³ betragen, die Ablation von der Schneegrenze an um 1 m pro 100 m Höhenabnahme zunehmen. Bei einer Zungenlänge von 0·3 km und einer Neigung von 27° liegt ihr Ende rund 150 m unter der Schneegrenze. Für die gesamte Zunge erhält man eine Durchschnittsablation von 0·75 m pro Quadratmeter, das ergibt rund 0·23 Mill. m³. Dem steht ein Zuwachs von 0·7 Mill. m³ gegenüber, das heißt aber: unter diesen Bedingungen kann die Zunge dort nicht ihr Ende haben, sie ist zu klein. Für den 4 km langen Gletscher ergeben sich folgende Zuwachs- und Ablationswerte: Nährgebiet 3 km², $3 \times 0·7 = 2·1$ Mill. m³ Zuwachs. Die 1 km lange Zunge reicht 450 m unter die Schneegrenze. Durchschnittsablation 2·25 m pro Quadratmeter ergibt 2·25 Mill. m³ pro Quadratkilometer. Unter diesen Bedingungen halten sich Zuwachs und Ablation die Waage. Das Teilungsverhältnis N : Z = 3 : 1 hat hier seine volle Gültigkeit (siehe Zeichnung).

Betrachtet man unter den gleichen Voraussetzungen den 13·3 km langen Hanggletscher, so erhält man einen Zuwachs von $10 \times 0·7 =$

⁷ Siehe vor allem folgende Schweizer Kartenblätter 1 : 50.000: Wassen 394; Guttannen 397; Tödi 404; Evolena 528; Combin 530; Matterhorn 531.



7 Mill. m³ pro Quadratkilometer und eine Ablation von 25 Mill. m³. Die Zunge wäre nun viel zu groß. Es sei besonders betont, daß man es bei den ersten beiden Beispielen mit Gesamthöhenunterschieden innerhalb des Gletschers von rund 600 und rund 1600 m zu tun hat, also Werten, die in den Alpen immer wieder auftreten. Das letzte Beispiel dagegen verlangt eine Höhendifferenz von 6000 m, ein Betrag, der nicht einmal im Karakorum und im Himalaja erreicht werden kann. Bei so großen Höhenunterschieden im Nähr- und Zehrgebiet werden auch Zuwachs- und Ablationsmittelwerte ganz anders.

Setzt man an Stelle des 25 bis 30° geneigten Hanggletschers einen solchen von 10° Neigung und nimmt man wieder die gleichen Zuwachs- und Ablationsbedingungen an, so beträgt der Zuwachs für den Gletscher 1, 07 Mill. m³, die Ablation rückt rechnerisch unter 0'1 Mill. m³ herab. Die Zunge ist im Verhältnis zum 27°-Gletscher noch kleiner, als für den Gleichgewichtshaushalt des Gletschers verlangt wird. Gletscher 2 weist einen Zuwachs von 2'1 Mill. m³ auf, die Ablation erreicht erst 0'85 Mill. m³. Die Zunge bleibt bei einem Teilungsverhältnis $N : Z = 3 : 1$ noch immer zu klein. Erst bei einem Gletscher von 9'3 km Länge erlangen Zuwachs und Ablation das Gleichgewicht. Sinkt die Gletscherneigung auf 5°, also einen Betrag, wie ihn die großen Talgletscherzungen über Kilometerstrecken beibehalten, so findet sich Übereinstimmung von Zuwachs und Ablation bei einem Verhältnis $N : Z = 3 : 1$ erst bei einem 15 km langen Gletscher. Infolge der geringen Neigung beträgt der Höhenunterschied vom Zungenende bis an den oberen Rand des Firnfeldes nur 1300 m (siehe Zeichnung II, III).

Diese Zahlen zeigen deutlich, daß das Teilungsverhältnis $N : Z = 3 : 1$ nur für bestimmte Neigungsverhältnisse und Größenordnungen gilt. Sie erweisen für unsere Zwecke die größere Ablationsleistung einer schnell tief unter die Schneegrenze reichenden kleinen und die geringe Ablationsleistung einer großen, flachen, langsam unter die Schneegrenze sinkenden Zunge. Kleine, flachgeneigte Gletscher können eine besonders große Zunge haben. Geht der Höhenunterschied der Zunge über 100 bis 200 m nicht hinaus, so wird aber im Gelände eine Teilung zwischen Nähr- und Zehrgebiet nicht mehr erfolgen können. Durch ein Jahr oder mehrere Jahre kann der ganze Gletscher selbst im Sommer noch Nährgebiet, in anderen Jahren wieder der ganze Gletscher Zehrgebiet sein.

Eine Einteilung in kleine und zugleich steilzungige und große und flachzungige Gletscher ist voll begründet. Die Gletscher mit relativ großer und steiler Zunge haben Merkmale beider Gruppen: steile Zungen- teile und flache Böden. Neben diesen Erscheinungen liegt wahrscheinlich in der Zähflüssigkeit des Eises und der damit verbundenen Anstauung

an den flachen Stellen mit die Ursache für die Zungengröße. Zur Entfaltung dieser Typen, vor allem der schnell in die Tiefe tauchenden kleinräumigen und der größeren, steilen, gestuften Zungen, aber auch der ganz großen, flachen, die infolge ihrer Länge dennoch eine beachtliche Höhendifferenz überwinden; ist ein genügender Höhenabstand zwischen der Schneegrenze und den nur wenige Promille geneigten Haupttalsohlen notwendig. Heute beträgt die Höhenspanne Talsohle—Schneegrenze in den Alpen vielfach 1500 bis 2000 und mehr Meter. Rund 1000 m reichen die tiefsten Ostalpenzungen, bis über 1500 m die der Westalpen unter die Firnlinie. In den tiefen Tälern mit hohen Stockwerken können die Zungen sich nicht nur frei entfalten, sondern sie bleiben hinter den Möglichkeiten, die das Relief für ihre Ausbildung geschaffen hat, zurück. Geht der Höhenunterschied Schneegrenze—Talsole auf etwa ein Drittel herab und wird von da an nur mehr promilleweise tieferes Areal gewonnen, so ist eine ungehemmte Zungenbildung nicht mehr möglich. Die Zungen müssen anwachsen.

Wie sehr die Talform und Talweite das Ausmaß der Ablation bei mächtigen Talgletschern bestimmen kann, besonders bei Gletschern, die über ihre heutige Größe bedeutend hinausgehen, also etwa den glazialen Ständen entsprechen, möge nachfolgende Überlegung zeigen. In ein Tal, das eine schmale Talsole aufweist, legt sich ein Gletscher hinein und erfüllt dieses Tal, dessen Seitenhänge 45° geneigt sind, 400 m hoch. An der Gletscheroberfläche soll eine Ablation von 1 m pro Quadratmeter herrschen und für das Gebiet der Tallichte, die zugleich die Gletscherbreite darstellt, die Einheit 1 betragen. Nimmt man dagegen eine Gletscherdicke von nur 200 m an, so geht die Oberflächenweite auf die Hälfte zurück, die Ablation dagegen steigt — es sei eben dieser Fall angenommen — von 1 m auf 2 m; als Gesamtleistung ergibt sich wieder 1 Einheit. Es ist gleichgültig, ob die Seitenwandneigungen 45° , 30° , 20° oder weniger betragen; die Ablationsleistungen bei 400 m und 200 m Gletscherdicken werden immer die gleichen sein, nur die absoluten Einheiten müssen bei geringeren Seitenhangneigungen wachsen.

Denkt man sich dagegen die Gletscher in einem solchen Tal wieder 400 m und 200 m mächtig, nimmt aber die Ablation an der Oberfläche mit 3 und 5 m an, so ergeben sich Ablationswerte von $3 \times 1 = 3$ und $5 \times \frac{1}{2} = 2\frac{1}{2}$ Einheiten, d. h. die größere und höhergelegene Oberfläche erfährt trotz der pro Flächeneinheit geringeren Erosionsleistung infolge der größeren Fläche eine stärkere Ablation als der tiefer liegende, schmälere Gletscher. Werden die Seitenwandneigungen geringer und wachsen die Oberflächenweiten der höher gespannten Gletscher, so steigen die Ablationsbeträge immer schneller. Nimmt man statt 3 und

5 m 5 und 7 m Ablation an, so erhält man $5 \times 1 = 5$ und $7 \times \frac{1}{2} = 3\frac{1}{2}$ Einheiten. Der Unterschied ist von 0·5 auf 1·5 Einheiten angewachsen. Bei mächtigeren Dickenunterschieden als 200 m stellt sich das Überwiegen der hochgespannten, weitflächigen, aber pro Quadratmeter geringeren Oberflächenablation gegenüber der intensiveren Ablation auf der kleinflächigen, tiefen Zunge erst bei hohen Ablationswerten ein.

Die Tabelle gibt für Dicken von 200 bis 800 m und Seitenhangneigungen von 45 und 22° die Ablationsbeträge in Einheiten an. Die Ablationseinheiten wurden errechnet aus der Ablationsstufe in Metern \times den Flächeneinheiten.

Seitenhangneigungen 45°.

Gletscher- dicke	Flächen- einheiten	Ablation in m	Ablations- einheiten						
200	4	2	8	5	20	6	24	7	28
400	8	1	8	3	24	4	32	5	40
300	6	4	24	6	36	7	43	8	48
600	12	1	12	3	36	4	48	5	60
400	8	5	40	7	56	8	64	9	72
800	16	1	16	3	48	4	64	5	50

Seitenhangneigungen 22°.

Gletscher- dicke	Flächen- einheiten	Ablation in m	Ablations- einheiten						
200	10	2	20	5	50	6	60	7	70
400	20	1	20	3	60	4	80	5	100
300	15	4	60	6	90	7	105	8	120
600	30	1	30	3	90	4	120	5	150
400	20	5	100	7	140	8	160	9	180
800	40	1	40	3	120	4	160	5	200

Lassen sich diese Überlegungen und Ergebnisse auf stadiale Gletscher anwenden? Ist es möglich, nicht nur allein mit Hilfe der abgelagerten Moränen die einstigen Zungen zu rekonstruieren, sondern auch schon aus den Formen und Neigungen des Geländes über Gletscher- und Zungengröße gewisse Aussagen zu machen? Ohne die Leitlinien der abgelagerten Moränen ist wohl kaum ein Anfang zu gewinnen. Für die genauere Einordnung nach Ständen und die Festlegung, ob es sich bei den Moränen um Erscheinungen handelt, die einem Gleichgewichtshaushalt des Gletschers oder außerordentlichen Bedingungen ihre Entstehung verdanken, können solche Überlegungen klärend wirken. Jeder

Vergleich setzt ähnliche Größenordnungen, mindestens als Ausgang, voraus. Wie verhalten sich die stadialen Stände zu den heutigen Alpengletschern? Nach den Untersuchungen von Penck und Brückner haben in letzter Zeit v. Klebelsberg⁸, Kinzl⁹, v. Srbik¹⁰, v. Grancy¹¹, Bobek¹², Lucerna und andere eine große Anzahl Moränenwälle, die den Stadialzeiten angehören, beschrieben, aufgenommen und sich um die Rekonstruktion der Gletscheroberfläche bemüht. Aus all diesen Arbeiten geht hervor, daß die in das Daunstadium zu stellenden Moränenwälle Gletscher bedingen, die, in den heute gerade eisfreien Gruppen, nirgends größer als unsere mittelgroßen heutigen Alpengletscher waren, viele jedoch bedeutend kleiner. In heute noch vergletscherten Gruppen wurden vielfach Kargletscher zu Talgletschern und Talgletscher zu größeren Talgletschern, aber kaum ein Gletscher der Ostalpen¹³ ging damals über heute westalpine Gletschergröße hinaus. Ja, man kann weit in die Stadialzeiten zurückgehen, bis in die Bühlzeit, um selbst in einer in der Gegenwart noch vergletscherten Gruppe keine das heutige Ausmaß um ein Vielfaches übersteigende Vergletscherung anzutreffen. Lucerna¹⁴ gibt auf Grund eingehender Untersuchungen eine Karte des Gletschers von Gmünd im Maltatal. Er stellt diesen Gletscher, der bis Trebesing im Liesertale reichte und eine Länge von rund 37 km hatte, in das Bülhlstadium. Eine Angabe für die damalige Schneegrenzlage bringt Lucerna nicht. A. Penck¹⁵ läßt die wärm-

⁸ R. v. Klebelsberg, Beiträge zur Geologie der Südtiroler Dolomiten. Zeitschr. d. Deutschen geolog. Ges. 1927, S. 280—354. — Ders., Alte Gletscherstände im Iseltal und in Rain in Taufers. Zeitschr. f. Gletscherk., 19. Bd. 1931, S. 163—178.

⁹ H. Kinzl, Beiträge zur Geschichte der Gletscherschwankungen in den Ostalpen. Zeitschr. f. Gletscherk., 17. Bd. 1929, S. 66—122. — Ders., Alte Gletscherstände im Oberpinzgau und im Gerlostale. Zeitschr. f. Gletscherk., 18. Bd. 1930, S. 227—233.

¹⁰ R. v. Srbik, Glazialgeologische Beobachtungen in den Lienzer Dolomiten. Zeitschr. f. Gletscherk., 18. Bd. 1930, S. 64—111. — Ders., Glazialgeologische Ergebnisse auf der Nordseite des Karnischen Grenzkammes. Zeitschr. f. Gletscherk., 24. Bd. 1936, S. 194—202.

¹¹ W. v. Senarclens-Grancy, Stadiale Moränen in den Deferegger Alpen. Zeitschr. f. Gletscherk., 20. Bd. 1932, S. 474—486. — Ders., Stadiale Moränen im Hochalmspitz-Ankogel-Gebiet. Zeitschr. f. Gletscherk., 23. Bd. 1935, S. 153—171.

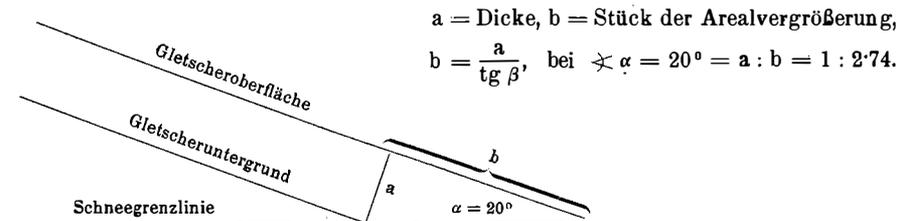
¹² H. Bobek, Alte Gletscherstände im Gebiet der Zillertaler und Tuxer Alpen. Zeitschr. f. Gletscherk., 20. Bd. 1932, S. 138.

¹³ R. Lucerna, Karte der Ur-Pasterze; Länge der Daun-Pasterze 21 km. Zeitschr. f. Gletscherk., 25. Bd. 1937.

¹⁴ R. Lucerna, Gletscher von Gmünd. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, 76. Bd. 1933, S. 262—281.

¹⁵ Penck-Brückner, Die Alpen im Eiszeitalter, S. 1072.

eiszeitliche Schneegrenze in 1700 m bei Spittal schräg über den Draugletscher gehen. Setzt man 300 m höher die des Bühlstadiums an, so kommt man zu 2000 m. Das Arealverhältnis über 2000 : unter 2000 m ist im Maltatal 1'5 : 1. Diese Zahl muß aber für die Feststellung des Nähr- und Zehrgebietes eine Korrektur erfahren. Die Gebiete des Groß- und Kleinelandtales, die heute gerade noch unter 2000 m liegen, bekamen vom Groß- und Kleinelandkees und der Brunnkarterrasse solche Eismassen zugeschoben, daß eine Erfüllung der Täler bis weit über 2000 m unbedingt erfolgte. Aber auch noch das Gebiet der Samerböden (1735 m), des Sonntags- und Ochsenbodens (1662 m) wird durch die aus dem Talhintergrund und von den Karen und Hängen der Seitenflanken herabdrängenden Eismassen bis in und über die Schneegrenze eiserfüllt gewesen sein. Eine Eisdicke von 300 bis 350 m reicht dazu aus. Heute weisen die Pasterze und der Hintereisferner bei weniger günstigen Zufluß- und Ernährungsbedingungen, als es die 2000-m-Schneegrenzzlinie für das innere Maltatal ist, schon ähnliche Eisdicken auf. Das Einzugsgebiet erfährt daher durch Hinzuzählung der obersten Talgebiete eine Vergrößerung. Die Eisdicke an den Hängen vergrößert ebenfalls das Einzugsgebiet. Bei der Annahme einer 200 m mächtigen Hangverglet-



schierung und einer Durchschnittsneigung von 20° ergibt sich für den Hangkilometer ein Einzugsarealzuwachs von 0.64 km^2 . Dieser Vergrößerung steht eine Arealverminderung weiter talaus, und zwar dort gegenüber, wo die Gebiete über 2000 m nicht mehr genügend groß sind, um ihre Seitengletscher bis zum Hauptgletscher vorzuschieben und damit nichts mehr zu seiner Ernährung beitragen können. Selbständige Hang- und Kargletscher begleiten da in der Höhe die Zunge. Unter dem Stubeck (2365 m) und unter der Dornbachalm (2408 m) nördlich und südlich von Malta beginnen diese Zonen und ziehen sich bis zur Gößgrabenmündung talein. Das korrigierte Verhältnis N : Z verschiebt sich etwas zugunsten des Nährgebietes und entspricht mit 1'6 : 1 den großen Gletschern des Berner Oberlandes (Unteraar 1'5 : 1, Oberaar 1'8 : 1, Aletsch 2 : 1).

Diese Berechnung muß jedoch eine weitere, nicht unwesentliche Berichtigung erfahren. Nicht alles Areal unter der Schneegrenze ist ja zugleich Zunge. Tal aus zu schiebt sich ein immer breiter werdender Streifen unvergletscherten Areals ein, der sich zwischen Zungenoberfläche und Schneegrenze einschaltet. Bei relativ hoher Talsohlenlage, geringem, gleichmäßigem Sohlengefälle, also mäßigem Abstand vom Tal zur Schneegrenze, wird jener eisfreie Streifen zwischen Gletscheroberfläche und der Schneegrenze nie allzu große Beträge erlangen können. Immerhin wächst das Verhältnis N : Z für unseren Fall auf den Wert 2'5 : 1 an.

Die Möglichkeit, das Gletscherende bei 2000 m hoher Schneegrenzlage schon südlich von Gmünd anzusetzen, stützen wohl die gegebenen Zahlen.

Bedingt ist dieses frühe Ende aber nicht allein durch das Verhältnis N : Z, sondern auch durch die relative Breite und Tiefe des Tales. Es kann z. B. das Nähr- zum Zehrgebietsverhältnis den Arealzahlen nach für eine Gletscherentwicklung ungünstig sein; wenn aber alles Areal nur wenige 100 oder 10 m unter der Schneegrenze liegt, so mangelt es doch an entsprechender Ablationsmöglichkeit. Das Maltatal weist 1'5 km tal aus von der Gmünder Hütte eine Höhenlage von kaum 1000 m auf und sinkt bis Gmünd ziemlich gleichmäßig gegen 700 m ab. 17 km bleibt die Talsohle 1000 bis 1300 m unter unserer Bühlschneegrenze. Selbst die Oberfläche einer mehrere 100 m mächtigen Zunge läge noch wesentlich tiefer als die Schneegrenze. Die Ablation muß kräftig beginnen und tal aus immer mehr zunehmen. Ein Zurücklegen der Hänge an der NO-Umrahmung, also dort, wo SW-Exposition herrscht, schafft, sollte auch die Gletscheroberfläche noch relativ hoch reichen, eine breite Abschmelzoberfläche, die der Zunge arg zusetzt. Auf der rund 32 km² großen Zungenoberfläche, die unter 1400 m Höhe liegt, können, rechnet man nach den Isohypsen, die Lucerna¹⁶ angibt, die Areale zwischen den 100-m-Linien aus und nimmt eine Ablation an, wie sie etwa heute in den Alpen 600 bis 1200 m unter der Schneegrenze vorkommt, 170 Mill. m³ Eis abgeschmolzen werden. Für ein Firnfeld von rund 150 km² ist diese Ablationsleistung, die sich dazu auf nur die gute Hälfte der Zunge, dabei allerdings auf jenen Teil, der am meisten der Ablation unterworfen ist, bezieht, sehr bedeutend. Das Ende des Bühlgletschers südlich von Gmünd gewinnt immer mehr an Wahrscheinlichkeit.

¹⁶ R. Lucerna, Gletscher von Gmünd. Mitt. d. Geogr. Ges. Wien, 76. Bd. 1933, S. 262—281.

All diese Vergleiche und Überschlagsrechnungen schließen eine Anzahl von Annahmen und Fehlerquellen ein. Die Resultate der Berechnungen um ein Viertel oder um die Hälfte zu erhöhen oder zu vermindern, fielen nicht besonders schwer. Könnte man aber aus den Moränenfunden wirklich ganz genau die Größe, Oberflächenform und Höhenlage einer stadialen Zunge angeben und wüßte man über den Ernährungsüberschuß im Firnfeld Bescheid, so wäre es möglich, über die Ablation genauere Angaben zu machen. Ein wenig läßt sich die Unsicherheit einengen. Setzt man die Werte, wie man sie heute für den Sonnblick kennt, in der Hochalmspitzgruppe ein, so wäre da ein Gesamtniederschlag von etwa 1 m in der Tiefe der Täler und ein solcher um 2 m in Kammhöhe zu verzeichnen. Zur Würmeiszeit lag der niederschlagreichste Gürtel in Europa nach A. Penck¹⁷ um 13 bis 15° südlicher. Nordwestspanien und Nordportugal hatten Niederschlagsverhältnisse, die den heutigen in Irland und Schottland entsprechen. Auch die Alpen haben dieser reichen Niederschlagszone angehört. Die tiefe eiszeitliche Schneegrenze am Nord- und Südrand der Alpen im Vergleich zum Böhmerwald, Harz und zu den Sudeten deutet darauf hin. Die inneren Gruppen mögen auch damals, vielleicht sogar etwas schneller, als heute, in eine gewisse Leelage gekommen sein (man beachte die hohe eiszeitliche Schneegrenzlage in den Gurktaler Alpen! 1900 m). In den zentralen Hochgruppen kann eine zweite Niederschlagsgunstzone bestanden haben. Setzt man trotz der starken Temperaturerniedrigung von 7 bis 8° für das Jahr und 10° für den Juli¹⁸ eine Niederschlagssteigerung von 30 bis 50% an, so erhält man für die Zentralzone Niederschlagswerte von rund 1,5 bis 3 m. Die Ablation auf den Firnfeldern muß geringer gewesen sein; bei ihrer Größe und Spaltenarmut bedeutet zeitweise oberflächliche Schmelzung noch lange nicht gänzliche Abfuhr und Verlust, sondern nur Verlagerung. Es blieb wohl ein wesentlicherer Firnanteil als heute für die Ernährung erhalten. Ein Mehr wird ja bei unserer gegebenen Überschlagsrechnung für den Maltagletscher unbedingt notwendig. Damit allein ist aber noch kein Anhaltspunkt gefunden, der nahelegt, daß damals die Ablation unter der Schneegrenze ähnlich wie heute verlief. Eine Annahme, die bei unserer Überschlagsrechnung stillschweigend gemacht wurde.

Berechnet man nach den Werten, die Penck für die eiszeitliche Temperaturerniedrigung Europas gegeben hat, die für das Bühlstadium

¹⁷ A. Penck, Europa zur letzten Eiszeit. Festschrift für Norbert Krebs, S. 222—237. Stuttgart 1936.

¹⁸ A. Penck, Europa zur letzten Eiszeit. Festschrift für Norbert Krebs, S. 226. Stuttgart 1936.

in der Weise, daß von der Gesamttemperaturerniedrigung rund drei Viertel auf unser Stadium kommen, so erhält man für Gmünd (740 m) zur Bülzeit eine Julitemperatur von 9.7° und eine Jahrestemperatur von 0.7° . Diese Werte entsprechen denen der Schmittenhöhe (Juli 9.2° , Jahr 0.8°) oder einer anderen Höhenlage um 2000 m in den Ostalpen. Der Oberfläche des Bühlgletschers bei Malta in 1400 m kommt eine Julitemperatur von 6.5° zu. Diese Beträge findet man heute zwischen 2300 und 2500 m. In der Höhe um 2000 m enden jetzt die tiefsten Zungen der Ostalpenglischer. In 2300 bis 2500 m liegen zum Teil noch flache Zungenstücke. Vom Zungenende (um 2300 m) nimmt die Ablation am Hintereisferner¹⁹ bis 2600 m Höhe von 7.6 m auf 3 m ab; am Rhône-gletscher schmolzen in 1800 m Höhe pro Jahr 12 m ab, in 2400 m 4 m. In Parallele zu diesen Werten hat man für die Bühlgletscheroberfläche bei Malta etwa 4 bis 6 m und bei Gmünd 8 bis 10 m Ablation anzunehmen.

Ein richtigeres Bild von der Bühlablation erhält man, wenn nicht die heutigen alpinen Abschmelzverhältnisse in entsprechender Temperaturlage Berücksichtigung finden, sondern bei gleichen Temperaturen in nördlicheren Breiten die dort vorhandenen Ablationswerte als Rechnungsgrundlage dienen. Da weist Island im Sommer dieselben Temperaturen auf²⁰. Dort liegt die Schneegrenze im Süden etwa 1000 bis 1300 m über dem Meeresspiegel. Das ist der gleiche Wert, der sich für Gmünd unter der Bühlschneegrenze errechnet. Die Ablation ist heute in Island trotz der langen Sommertage wohl geringer als in gleicher Temperaturlage in den Alpen. Gemessene Ablationswerte fehlen leider. In Mittelnorwegen beträgt die Abschmelzung 400 m unter der Schneegrenze nach den Angaben von Heß²¹ 3 bis 3.3 m, das ist gegenüber den alpinen Werten (4 m) eine Abnahme um ein Viertel. Aber selbst bei Einsetzung dieser niedrigeren Ablationsbeträge würde der Maltagletscher nicht viel über die von Lucerna festgestellten Grenzen hinausreichen.

¹⁹ H. Heß, Die Gletscher, S. 214. Braunschweig 1904.

²⁰ Reykjavik, 5 m (1873—1920), Juli 10.9° ; Stykkisholmur, 11 m (1873—1920), Juli 10.0° .

²¹ Siehe H. Heß a. a. O., S. 218. In hohen Breiten spielt die Zunahme der Ablation nach der Tiefe hin wohl infolge des lang andauernden Tages nicht mehr diese Rolle wie in mittleren und niederen Breiten. Das Abschmelzprofil des Hamarjukgletschers in Westgrönland zeigt dies (Beobachtungszeit 1930/31; in 50 m Höhe 4.4 m, bzw. 3.4 m, in 270 m 3.9 m, bzw. 3.5 m, in 570 m 3.6 m, in 950 m 1.6 m Abschmelzung. Siehe Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Grönland-Expeditionen 1929 und 1930/31, Bd. 3, Leipzig 1935).