

Beiträge zur Geologie der Schweiz - Geotechnische Serie - Hydrologie

4. Lieferung

Herausgegeben von der Geotechnischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft  
gemeinsam mit dem Institut für Gewässerkunde der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

# ZUM WASSERHAUSHALT DES SCHWEIZER HOCHGEBIRGES

## I. BAND

### I. Teil

## ALLGEMEINES

### Zweite Abteilung

4. Kapitel. Die Bedeutung und Bewertung der Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher im Schweizer Hochgebirge.
5. Kapitel. Beobachtungen über das Verhalten des vorstoßenden Obern Grindelwaldgletschers im Berner Oberland.

Von

**O. Lütschg-Loetscher**

---

Mit 10 Tafeln, 21 Figuren und 6 Tabellen

---

---

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG., Geographischer Verlag, Bern  
Nr. 7612 BRB 3. 10. 1939

Zürich 1944

Druck von Aschmann & Scheller AG. / Buchdruckerei „zur Froschau“ / Zürich



## Vorwort des Verfassers

Die jahrelange Beschäftigung mit der Hydrologie des Schweizer Hochgebirges hat eine Reihe kleiner Arbeiten gezeitigt, die teils einzelne Fragen dieser Disziplin eingehender behandeln, als in den zugehörigen Abschnitten des Werkes möglich war, teils an Orten ausgeführt wurden, die außerhalb der in Untersuchung gezogenen Forschungsgebiete liegen. Im weitern sollten diese, in sich geschlossenen Studien die Diskussion über einzelne wichtige hydrologische Probleme anregen. Dies ist erfreulicherweise nicht ausgeblieben und so ins Leben gerufene sachliche Erörterungen sind mir bei der Abfassung dieses Werkes von großem Nutzen gewesen. Zur Entlastung bestimmter Fragen, die in den folgenden Teilen des Werkes behandelt werden, wird öfters auf diese, in sich geschlossenen Einzelarbeiten verwiesen.

Auf Wunsch der *Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* erfolgt die Ausgabe der vorliegenden Kapitel 4 und 5 *vorgängig* dem ganzen ersten Teil des Werkes (Band I) in Form der vorliegenden zweiten Abteilung dieses Bandes.

Basel, im August 1944.

O. Lütschg-Loetscher.

## Vorwort der Geotechnischen Kommission

Aus den vom Verfasser im Vorwort mitgeteilten Gründen erscheinen die Kapitel 4 und 5 des ersten Bandes der Lieferung 4 (als I. Band, I. Teil, zweite Abteilung) vorgängig den andern Kapiteln des Bandes. Im übrigen sei auf das Vorwort im bereits erschienenen II. Band des Werkes verwiesen.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Verfasser allein verantwortlich.

### Für die Geotechnische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft:

Der Präsident: Prof. Dr. P. Niggli.

Der Aktuar: Dr. F. de Quervain.



## Inhaltsverzeichnis.

### I. TEIL.

### Allgemeines.

#### Zweite Abteilung.

#### 4. KAPITEL.

#### Die Bedeutung und Bewertung der Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher im Schweizer Hochgebirge.

	Seite
I. <i>Allgemeines</i> . . . . .	61
II. <i>Bestimmung der Vorratsänderungen</i> . . . . .	64
A. Allgemeines . . . . .	64
B. Spezielles . . . . .	64
C. Ergebnisse . . . . .	67
Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal . . . . .	67
Flächenänderung der Gletscher im obern Saastal vom September 1932 bis September 1934 . . . . .	68
Massenberechnung der Gletscherschwankungen . . . . .	69
Allgemeines . . . . .	69
Linien gleicher Höhenänderung (Methode A. v. Speyr) . . . . .	69
D. Andere Verfahren zur Bestimmung der Wasserbilanz der Gletscher . . . . .	70
1. Allgemeines . . . . .	70
2. Direkte Messung der Zu- oder Abnahme des Gletschers (Methode E. Hoock) . . . . .	73
Kritik dieser Methode . . . . .	74
III. <i>Schluß</i> . . . . .	74

#### 5. KAPITEL.

#### Beobachtungen über das Verhalten des vorstoßenden Obern Grindelwaldgletschers im Berner Oberland.

I. <i>Einleitung</i> . . . . .	75
II. <i>Die Untersuchungen am Obern Grindelwaldgletscher: Bewegung der Erosionswirkung in den Jahren 1921 bis 1928</i> . . . . .	79
A. Allgemeines . . . . .	79
B. Die Schwankungen des Obern Grindelwaldgletschers im allgemeinen . . . . .	81
Nachrichten über die Schwankungen des Obern Grindelwaldgletschers . . . . .	82
C. Die Eisbewegung der Zunge im Zeitraum von 1921 bis 1928 . . . . .	85
1. Messung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	85
2. Eisbewegung . . . . .	86

	Seite
D. Erosionswirkung . . . . .	91
1. Allgemeines . . . . .	91
2. Bestimmung der Lage und Tiefe der Bohrlöcher, sowie der Höhenlage ihrer Verbindungslinien (Längs- und Querprofile) . . . . .	94
3. Tiefenmaße der Bohrlöcher vor und nach dem Vorstoß . . . . .	96
4. Höhenlage der Felsbänder-Profile vor und nach dem Vorstoß . . . . .	96
5. Eisgeschwindigkeit über den Felsbändern . . . . .	97
6. Ueberlagerung der Felsbänder mit Moräne und Eis . . . . .	98
7. Erosionsergebnisse . . . . .	99
E. Massenbilanz des äußersten Teiles der Gletscherzunge . . . . .	100

### Verzeichnis der Tafeln.

#### Zu Kapitel 4.

- Tafel 1. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark» 1932*  
 Allalin-, Hohlaub- und Keßjengletscher  
 Terrestrische stereophotogrammetrische Aufnahme vom 19. Sept. bis 6. Okt. 1932. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 10 m (Prof. Dr. M. Zeller) . . . nach 64
- Tafel 2. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark» 1932*  
 Hangend-, Schwarzenberg-, Seewinen-, Monte Moro-, Thäliboden- und Ofenthalgletscher  
 Terrestrische stereophotogrammetrische Aufnahme vom 19. Sept. bis 6. Okt. 1932. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 10 m (Prof. Dr. M. Zeller) . . . nach Tafel 1
- Tafel 3. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark» 1934*  
 Allalin-, Hohlaub- und Keßjengletscher  
 Terrestrische stereophotogrammetrische Aufnahme vom 19. bis 28. Sept. 1934. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 10 m (Prof. Dr. M. Zeller) . . . nach Tafel 2
- Tafel 4. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark» 1934*  
 Hangend-, Schwarzenberg-, Seewinen-, Monte Moro-, Thäliboden- und Ofenthalgletscher  
 Terrestrische stereophotogrammetrische Aufnahme vom 19. bis 28. Sept. 1934. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 10 m (Prof. Dr. M. Zeller) . . . nach Tafel 3
- Tafel 5. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark»*  
 Allalin-, Hohlaub- und Keßjengletscher  
*Linien gleicher Höhenänderung*. Sept. 1932 bis Sept. 1934. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 2 m . . . nach 70
- Tafel 6. *Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte Rosa-Gruppe)*  
*Gletschervermessung «Mattmark»*  
 Hangend-, Schwarzenberg-, Seewinen-, Monte Moro-, Thäliboden- und Ofenthalgletscher  
*Linien gleicher Höhenänderung*. Sept. 1932 bis Sept. 1934. Maßstab 1:25 000, Aequidistanz 2 m . . . nach Tafel 5  
 (Originalaufnahmen sämtlicher Gletscher 1:10 000.)

#### Zu Kapitel 5.

- Tafel 7. Zungengebiet vom Oberrn Grindelwaldgletscher, aufgenommen von *Erwin Schnitter* vom 13. bis 24. Juni 1919, Eisstand vom 15. Juni 1919. Maßstab 1:5000, Aequidistanz 5 m.  
 Originalaufnahme 1:2500 . . . . . nach 94<sup>A</sup>
- Tafel 8. Zunge vom Oberrn Grindelwaldgletscher vom 28. bis 31. Mai 1925, aufgenommen von Dr. *R. Helbling* in 1:5000, Aequidistanz 5 m und vergrößert auf 1:2500 durch *Leupin* und *Schwank*, Bern . . . nach Tafel 7

- Tafel 9. Oberer Grindelwaldgletscher.  
Terrestrische stereophotogrammetrische Aufnahme des *Photogrammetrischen Instituts E.T.H.* (Prof. Dr. M. Zeller) vom Juni 1932. Maßstab 1 : 5000, Aequidistanz 2 m. Originalaufnahme 1 : 2500 . . . . . nach Tafel 8
- Tafel 10. *Massenbilanz der Zunge des Oberen Grindelwaldgletschers.*  
*Linien gleicher Höhenänderung*, Maßstab 1 : 5000 . . . . . nach 100
- Fig. 31. *Juni 1919 bis Mai 1925.*  
Grundlagen: Meßtischaufnahme 1 : 2500 von E. Schnitter, Juni 1919, und photogrammetrische Aufnahme 1 : 5000 von Dr. R. Helbling, Mai 1925, vergrößert und umgearbeitet auf 1 : 2500 durch Leupin und Schwank. Konstruiert von A. v. Speyr . . . nach 100
- Fig. 32. *Mai 1925 bis Juni 1932.*  
Grundlagen: Photogrammetrische Aufnahme 1 : 5000 von Dr. R. Helbling, Mai 1925, vergrößert und umgearbeitet auf 1 : 2500 durch Leupin und Schwank. Aufnahme des *Photogrammetrischen Instituts der E.T.H.*, Juni 1932. Konstruiert von A. v. Speyr nach 100
- Fig. 33. *Juni 1919 bis Juni 1932.*  
Grundlagen: Linien gleicher Höhenänderung von Juni 1919 bis Mai 1925 und von Mai 1925 bis Juni 1932. Konstruiert von A. v. Speyr . . . . . nach 100
-



#### 4. KAPITEL.

## Die Bedeutung und Bewertung der Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher im Schweizer Hochgebirge.

(Hierzu die Tafeln 1 bis 6.)

### I. Allgemeines.

Die Eisbedeckungsfläche der Schweizer Alpen wurde 1877 vom *Eidg. Statistischen Bureau* aus den Karten des «Siegfried-Atlas» auf  $1841 \text{ km}^2$  bestimmt. Von *J. Jegerlehner*<sup>1)</sup>, der im wesentlichen das gleiche Material benutzte, wurde sie mit  $1838,8 \text{ km}^2$  fast ebenso groß befunden. Seither ist sie infolge des gewaltigen allgemeinen Rückzuges der Gletscher wesentlich kleiner geworden. Ueber das «Wieviel» sind wir im unklaren, da eine neue allgemeine Bearbeitung erst dann möglich sein wird, wenn der neue Atlas der *Eidg. Landestopographie* vollendete Tatsache ist.

Das ganze Alpengebiet von der Mont Blanc-Kette bis zur Ankogelgruppe (Hohe Tauern) umfaßt, wenn wir vom Areal der Gletscher in der Dauphiné und im westlichen italienischen Alpengebiet absehen, eine Eisbedeckung von  $3765,9 \text{ km}^2$ ; daraus erhellt, daß in der Schweiz rund die Hälfte des Gesamtareals den Gletschern der Alpen zufällt. Die große Bedeutung der Gletscher im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges gelangt dadurch kraftvoll zum Ausdruck.

Bei den Gletschern unserer Alpen stellt sich gewissermaßen ein Gleichgewichtszustand mit den klimatischen Verhältnissen ein.<sup>2)</sup> Die höhern Regionen speichern in Form von Schnee, Firn und Eis, die sich allmählich in einen Eisstrom umwandeln, den Ueberschuß an Niederschlag auf, es sind dies die *Rücklagen*; in den trockenen, warmen Zeiten geben ihn die Gletscher durch Schmelzung (Ablation) wieder ab, wir verstehen darunter den *Aufbrauch früherer Rücklagen*. Große Gletscher gleichen sämtliche klimatischen Schwankungen vieljährig aus. Die Ausgleichung vollzieht sich durch ihre Größenschwankungen (Flächen- und Höhenausdehnung). Der niederschlagsammelnde Gletscher wächst, der aufgespeicherten Vorrat abgebende Gletscher schwindet. Ein Wechsel in der Gletscher-Zu- und -Abnahme vollzieht sich in recht ungleichen Zeiträumen. Entsprechend der Lage, Ausdehnung und Gestalt der Gletscher kann die jährliche Zu- oder Abnahme an Schnee, Firn und Eis, je nach der Witterung, Beträge von vielen Millionen Kubikmetern erreichen.<sup>3)</sup> Die ausglei-

<sup>1)</sup> *Jegerlehner J.*: Die Schneegrenze in den Gletschergebieten der Schweiz. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 1902, Bd. V.

<sup>2)</sup> Je nachdem die Mitteltemperaturen und der Niederschlag über, gleich oder unter dem Durchschnitt sind, muß sich auch der Gletscher unten und oben entsprechend verhalten, was mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie übereinstimmt.

<sup>3)</sup> Hierüber nur ein Beispiel. Im außergewöhnlichen Trockenjahr 1920/21 vermochten sich im Rhonegletschergebiet in der Dammagruppe (Größe  $38,87 \text{ km}^2$ , davon Gletscher  $24,19 \text{ km}^2 = 62,2 \%$ ) keine Rücklagen von Belang zu bilden. Für den Verbrauch früherer Rücklagen ergibt die Rechnung aus den Beziehungen zwischen Niederschlag, Abfluß und Verdunstung eine totale Abflußmasse von  $44,3 \text{ Mill. m}^3$ , woraus wohl eindrucksvoll genug hervorgeht, welche Bedeutung den Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher zukommt.

chenden Eigenschaften der Gletscher für den Abfluß erstrecken sich nicht nur auf Jahreszeiten und Einzeljahre, sondern auch über Zeiträume von zehn, fünfzig und mehr Jahren. Eine zahlenmäßige Erfassung der Beträge für Rücklage und Verbrauch früherer Rücklagen ist nur dann möglich, wenn alle Erscheinungen, die auf die Größenänderung der Gletscher einwirken, auf das genaueste verfolgt und erkannt, und deren Einfluß auf den Abfluß zahlenmäßig erfaßt werden kann. Nur auf der Grundlage solcher Erkenntnis ist es möglich, das vorliegende Problem einwandfrei zu lösen.

Für die Lösung dieser bedeutsamen Frage sind bis vor wenigen Jahren nur vereinzelte Schritte unternommen worden, Schritte, die sich jeweilen nur auf Teilstücke, auf sog. Nachmessungen der Gletscher, meist nur auf die Bewegungsvorgänge im Stirngebiet der Gletscherzungen beschränkten. Der Wert solcher Teilnachmessungen wurde lange Zeit weit überschätzt, hydrologisch betrachtet kommt ihnen zweifellos nur untergeordnete Bedeutung zu.

Um womöglich doch ein annäherndes Bild über die Flächen- und Volumenänderungen einiger hierfür besonders geeigneter Gletscher für bestimmte Zeiträume zu erhalten, haben wir den Versuch unternommen, Gletscherflächen und Höhenlagen von alten Original-Siegfriedkarten mit solchen von neueren und neuesten Original-Revisions-Siegfriedblättern in Vergleich zu bringen. Dabei ist mir die Direktion der *Schweiz. Landestopographie*, insbesondere ihr Chefsingenieur *H. Zölly*, in verdankenswerter Weise entgegengekommen, indem mir das dazu notwendige Kartenmaterial in vollem Umfange zur Verfügung gestellt wurde. Bei näherer Prüfung dieser Frage ergab sich aber, daß Kartenmaterial zur Volumenbestimmung gar nicht, zur Flächenbestimmung — nur in sehr beschränktem Maße herangezogen werden konnte. Für die Volumenbestimmung reicht die Zahl der auf den Gletschern selbst eingemessenen Punkte bei weitem nicht aus, für die Flächenbestimmungen — stehen nur für die untersten Teile der Zunge Neuaufnahmen zur Verfügung, in den mittlern und obern Partien sind fast ohne Ausnahme keine Nachmessungen ausgeführt worden.

Aus vorstehendem erhellt eindrucksvoll, welche große Bedeutung *stereo- und luftphotogrammetrischen Aufnahmen* von *ganzen* Gletschergebieten für die Hydrologie und Glaziologie zukommt. Wir dürfen wohl sagen, daß die zahlenmäßige Lösung der vorliegenden Frage, ja noch mehr, daß die Aufstellung der Wasserbilanz einer vergletscherten Hochgebirgslandschaft erst möglich geworden ist, seit es unsern geodätischen Instituten gelungen ist, neue Instrumente und Methoden zu schaffen, die stereo- und luftphotogrammetrische Aufnahmen *hoher* Genauigkeitsgrade garantieren. Die moderne Gewässerkunde verdankt einen Teil ihrer heutigen Entwicklung und Fortschritte der schöpferischen Tätigkeit der Photogrammetrie. Diese Fortschritte hat sich der Verfasser weitmöglichst zunutze gemacht; er hat sich mit den leitenden Persönlichkeiten der geodätischen Institute der Schweiz in Verbindung gesetzt und hat dabei wertvollste Unterstützung gefunden. Es ist mir daher ein besonderes Bedürfnis, auch an dieser Stelle den Leitern des *Geodätischen Institutes der Eidg. Techn. Hochschule* in Zürich, den Professoren *Dr. F. Bäschlin* und *Dr. M. Zeller*, dem Leiter der *Geodätischen Abteilung der Landestopographie*, Chefsingenieur *H.*

Zölly, und dem Direktor des *Eidg. Grundbuchamtes*, Dr. J. Baltensberger, für ihr großes Entgegenkommen herzlich zu danken.

Untersuchungen über das Verhalten der Landesverdunstung ( $V$ ) (als Gebiets- oder Landesverdunstung aufgefaßt) im Wasserhaushalt *vergletschter* Gebiete werden, wie wir gesehen haben, dadurch wesentlich verwickelter, daß einerseits ein Teil des Niederschlages in natürlicher Aufspeicherung als Schnee, Firn und Eis im Nährgebiet der Gletscher zugunsten der Zukunft zurückbleibt (Rücklagen  $R$ ), andererseits aber Wasser aus dem Abschmelzgebiet der Gletscher zum Abfluß oder zur Verdunstung gelangt, das von weit zurückliegenden Niederschlägen stammt (Aufbrauch früherer Rücklagen  $B$ ). Diese Teile des Niederschlages und des Abflusses erfordern bei der Aufstellung des Wasserhaushaltes vergletschter Landschaften ganz besondere Sorgfalt. Da der Abfluß ( $A$ ) aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ( $N - V$ ) hervorgeht, da ferner die Beträge für die Verdunstung und für den Aufbrauch früherer Rücklagen (Schnee, Firn und Eis) mit steigender Temperatur größer werden, ist klar, daß für vergletscherte Gebiete in der Bilanzgleichung  $N = A + V + (R - B)$  dem Glied  $(R - B)$  *große*, ja ausschlaggebende Bedeutung zukommt, denn in der Regel handelt es sich in der Größenordnung der Vorratsschwankungen von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt usw. um so erhebliche Beträge, daß an die Genauigkeit der einzelnen meßbaren Grundwerte für die Aufstellung der Wasserbilanz *hohe*, ja *höchste Anforderungen* gestellt werden müssen; es ist dies ein um so dringlicheres Erfordernis, als die Größe der Landesverdunstung aus der *Differenz* von  $N - A$  hervorgeht.

Die Bestimmung der Gebietsverdunstung  $V$  aus einer *langen* Reihe von Jahren setzt, solange es sich um *gletscherfreie* Gebiete handelt, nur genaue mittlere Werte für  $N$  und  $A$  voraus, bietet aber sonst keine besondern Schwierigkeiten, denn es kommt, wie bekannt, den Vorratsänderungen für längere Zeiträume, weil das Glied  $(R - B)$  praktisch beurteilt wegfällt, nur noch untergeordnete Bedeutung zu. Je kürzere Zeiträume aber ins Auge gefaßt werden, desto mehr wachsen die Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Vorratsänderungen. Sie sind zweifellos groß, aber durchaus überwindbar. Ihre Bewältigung erfordert viel Mühe und Arbeit und ist nur dann von Erfolg begleitet, wenn das Problem mit allen zu Gebote stehenden Mitteln angepackt und seine Lösung planmäßig verfolgt und gefördert wird.

Die Rücklagen, die sich in einer Hochgebirgslandschaft zu bilden vermögen, können die verschiedensten Formen annehmen. In Betracht fallen: Erhöhung der Wasserstände in den offenen Gewässern (Zunahme der in den Flußbetten und Seebecken enthaltenen Wassermassen), Aufspeicherung von Wasser in Talsperren, natürliche Aufspeicherung im Boden, wobei man zwischen Haft-, Sicker- und Grundwasser unterscheiden kann. In Karstgebieten kommt den Rücklagen in Höhlensystemen (unterirdische felsige Hohlräume) Bedeutung zu, in Gletschergebieten der Aufspeicherung von Schnee, Firn, Eis und Wasser (Gletscherseen). Die Bestimmung dieser Rücklagen bildet in der Frage des Wasserhaushaltes einer Hochgebirgslandschaft ein besonders reizvolles, aber, wie wir bereits gesehen haben, schwieriges Thema, auf das in der Folge näher eingetreten werden soll.

## II. Bestimmung der Vorratsänderungen.

### A. Allgemeines.

Die auf dem Wege der Ausgleichung ermittelten Beziehungslinien zwischen den *gemessenen* Niederschlags- und Abflußwerten *vergletschter* Gebiete, hervorgegangen aus den einzelnen Jahrespunkten einer ganzen Reihe von Jahren, werden in der Regel nur dann zu Geraden mit annähernd  $45^\circ$  Neigung, wenn den Vorratsänderungen der Gletscher des ganzen Gebietes in ihrem Gesamtumfange Jahr für Jahr voll Rechnung getragen wird. Um dies zu verstehen, braucht man nur an die gewaltigen Wasserverluste zu denken, die unsere Alpengletscher seit Beginn der letzten großen Rückzugsperiode Mitte des vergangenen Jahrhunderts erlitten haben. Sie gehen in die Millionen von Kubikmetern.<sup>1)</sup>

Sind einmal für eine respektable Zahl von charakteristischen Gletschergebieten solche Beziehungslinien (also mit voller Berücksichtigung der Vorratsänderung) vorhanden — ich nenne solche Linien *Beziehungsgrundlinien* —, dann ermöglicht die Lage jedes einzelnen neuen Jahrespunktes im Koordinatensystem, hervorgegangen aus den *gemessenen* Werten für Niederschlag und Abfluß und mit Berücksichtigung der Vorratsänderung im *unvergletschten* Teil des Forschungsgebietes (also ohne Berücksichtigung der Vorratsänderung im vergletschten Teil), einen tiefen Einblick in die Massenänderung der im Gebiet vorhandenen Gletscher. In der Beurteilung der Sachlage muß natürlich auch den Verhältnissen des vorhergehenden Jahres geziemend Rechnung getragen werden.

Aus vorstehendem dürfte die hohe Bedeutung solcher Beziehungsgrundlinien für die Gletscher- und Klimakunde klar genug hervorgehen. Systeme solcher Beziehungsgrundlinien sind dazu angetan, neue Wege zu öffnen, ja, den Schlüssel zu liefern zur Lösung der Frage der Klimaschwankungen des Hochgebirges. In meinen Vorträgen über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge habe ich wiederholt auf die Bedeutung solcher Zusammenhänge hingewiesen.

Verlauf und Neigung der Beziehungslinien, sowie das Maß der Streuung der einzelnen Jahrespunkte sind, allgemein aufgefaßt, eigentliche Prüfsteine für die Qualität, die Genauigkeit der einzelnen Unterlagen.

Die genaue Bestimmung des Gliedes  $(R - B)$  der Bilanzgleichung  $N = A + V + (R - B)$  darf wohl als die dringendste Aufgabe der modernen Gewässer- und Gletscherkunde bezeichnet werden.

### B. Spezielles.

Experimentelle und methodische Untersuchungen über die Größenänderungen der Gletscher zur Aufstellung der Wasserbilanz vergletschter Alpengebiete, besonders zur zahlenmäßigen Erfassung der Beträge für Rücklage und Aufbrauch (Akku-mulation und Ablation), erfolgten erstmals auf meine Anregung hin, durch das *Institut für Gewässerkunde der E.T.H.* unter Mitwirkung des *Geodätischen Institutes der E.T.H.* und finanziell unterstützt durch die *Stiftung zur Förderung schweizerischer Volkswirtschaft durch wissenschaftliche Forschung* und die *Gletscherkommission der*

<sup>1)</sup> Vgl. Fußnote S. 61.

Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft im oberen Saastal, das der Monte Rosa-Gruppe zugehört. Es handelt sich dabei um die Massenänderungen sämtlicher neun Gletscher im Forschungsgebiet von *Zermeiggen*<sup>1)</sup> (das Einzugsgebiet umfaßt 65,25 km<sup>2</sup>, wovon 29,09 km<sup>2</sup> = 44,6 % vergletschert sind).

Von allen Gletschern dieses Gebietes mußte zunächst eine Karte im Maßstabe 1 : 10 000 aufgenommen werden, wobei folgende Gesichtspunkte maßgebend waren<sup>2)</sup>:

Die Genauigkeit der Aufnahmen soll derart sein, daß die Lagefehler innerhalb der praktisch erreichbaren Zeichengenauigkeit von  $\pm 0,2$ — $0,3$  mm bleiben. Für den Maßstab 1 : 10 000 und eine Geländeneigung von 20 % folgt daraus ein mittlerer Höhenfehler des Kurvenbildes von ungefähr  $\pm 0,5$  m, der in flachen Partien auf etwa  $\pm 0,2$  m sinkt. Die hier skizzierte Aufgabe läßt sich nach dem kompetenten Urteil von Prof. M. Zeller nur mit der stereophotogrammetrischen Methode lösen, wobei sowohl terrestrische Aufnahmen, als auch solche aus dem Flugzeug in Frage kommen können. Im vorliegenden Falle wurde die terrestrische Photogrammetrie gewählt, weil im Aufnahmegebiet bereits eine große Anzahl (rund 75) trigonometrisch bestimmter Punkte der Landesvermessung für terrestrische Beobachtungen signalisiert waren. Ein sehr wichtiger Punkt für die Wahl der terrestrischen Photogrammetrie war, neben guter Unterkunftsmöglichkeit im Gebiet, die Forderung nach wiederholten Aufnahmen in Zeitintervallen von einigen Jahren.

Im Herbst 1931 fand eine erste Begehung und Rekognoszierung des Gebietes durch Prof. M. Zeller statt, wobei auch schon einige Stationen versichert und gemessen wurden. Im Sommer 1932 wurden im ganzen 23 photogrammetrische Stationen definitiv festgelegt und die notwendigen geodätischen Messungen ausgeführt. Die Versicherung der Standpunkte erfolgte durch Bohrlöcher, die mit roter Farbe und Steinmännern gekennzeichnet wurden. Die photographischen Aufnahmen wurden vom 19. bis 22. September und vom 2. bis 6. Oktober 1932 durch Prof. M. Zeller ausgeführt (vgl. die Fig. 13, 14 und 15). Der Unterbruch ist durch ungünstiges Wetter mit unbedeutenden Schneefällen verursacht worden. Die Auswertung von rund 75 Plattenpaaren erfolgte auf zwei maßhaltige, mit Zeichenpapier überzogene Aluminiumtafeln und ergab alle Gletscher- und Firnfelder und deren nächste Umgebung.

Die zweite Aufnahme wurde ebenfalls durch Prof. M. Zeller, mit Unterstützung von Dipl.-Ing. J. O. Reimann durchgeführt und fand vom 17. bis 29. September 1934 statt.<sup>3)</sup> Die Auswertung beschränkte sich auf die Gletscher und Firnfelder und erfolgte auf Pauspapier, um eine unmittelbare Vergleichung mit den Aufnahmen von 1932 zu ermöglichen.

Gleichzeitig mit den photographischen Aufnahmen wurden durch unser Institut (Techniker R. Bohner) Schnee- und Firndichtemessungen vorgenommen, um genaue Anhaltspunkte über den Wasserwert der festen Rücklagen in den Schnee- und Firnregionen zu erhalten.

<sup>1)</sup> Vgl. hierüber *Lütsch O.*: Ueber Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge. Zürich 1926.

<sup>2)</sup> Ich entnehme die folgenden Ausführungen im wesentlichen einem Bericht von Prof. Dr. M. Zeller vom 29. Januar 1936, über die stereophotogrammetrische Gletschervermessung «Mattmark».

<sup>3)</sup> Die zweite Aufnahme erfolgte aus *versuchstechnischen* Gründen schon nach zwei, statt wie vorgesehen nach fünf Jahren. Sie war nicht nur vom hydrologischen Standpunkt aus wünschbar, um über die Methode ein einwandfreies Bild zu erhalten, sondern auch in vermessungstechnischer Beziehung angezeigt. Dies namentlich, um die Sicherung der Aufnahmestandpunkte kontrollieren und wo notwendig, erneuern zu können.

Strahlhornmassiv



Fig. 13.

Blick von Punkt 3150 der Siegfriedkarte (zwischen Hohlaub- und Allalingletscher) auf das Strahlhornmassiv und den Allalingletscher.  
(Basispunkt Nr. 11 der terrestrischen photogrammetrischen Aufnahme.)

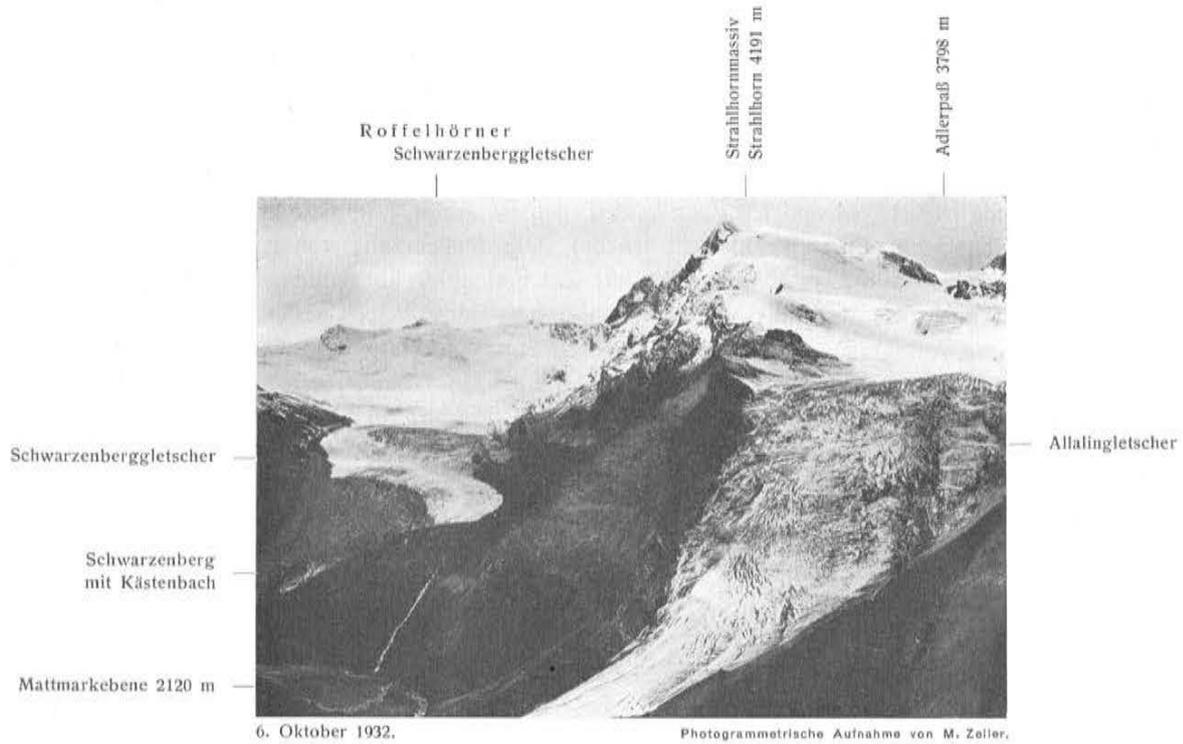


Fig. 14.

Blick vom Westhang des Mittelgrates auf Schwarzenberg- und Allalingletscher.  
(Basispunkt Nr. 4 der terrestrischen photogrammetrischen Aufnahme.)

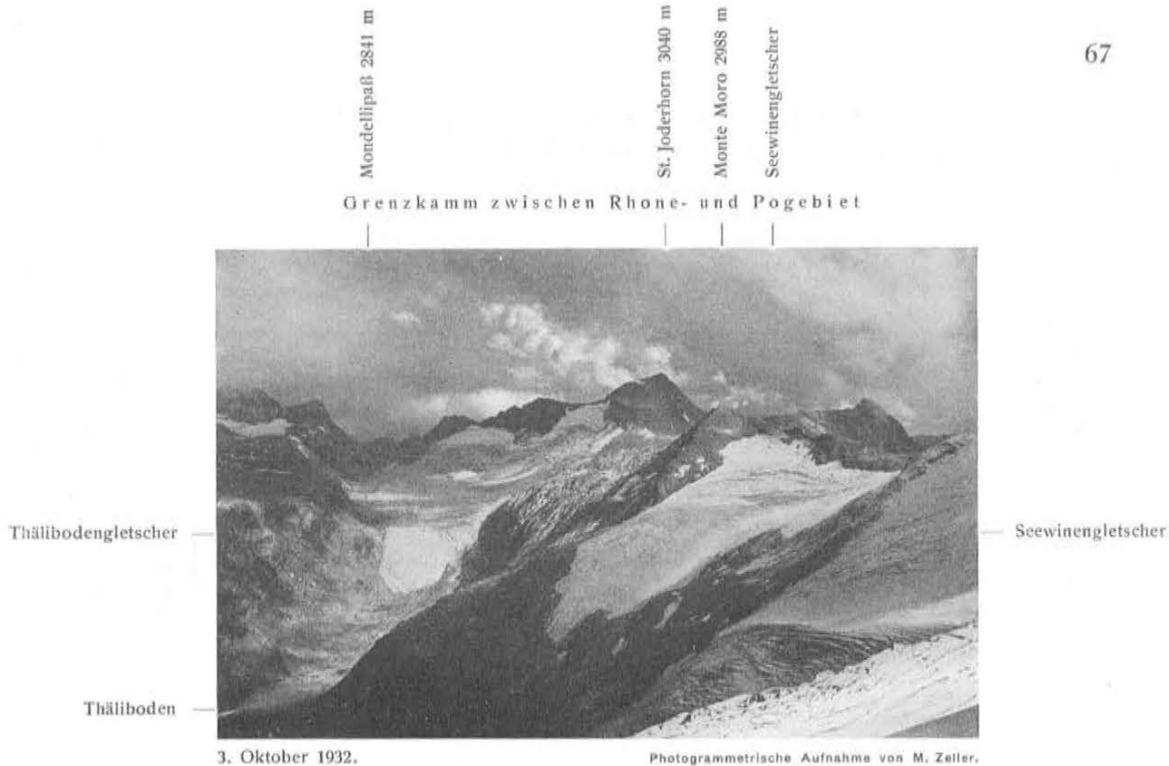


Fig. 15.

Blick vom südwärts gerichteten Ausläufer des Seewinenberges (Standort nördlich Kote 3087) auf Thäliboden, Thälibodengletscher und Seewinengletscher.  
(Basispunkt Nr. 16 der terrestrischen photogrammetrischen Aufnahme.)

Sämtliche Aufnahmen sind in photographischer und vermessungstechnischer Beziehung einwandfrei gelungen. Während des Sommers 1932 wurde ferner eine bereits bestehende photogrammetrische Aufnahme 1 : 25 000 der *Eidg. Landestopographie* des ganzen Gebietes mit dem Meßtisch ergänzt. Diese Aufnahme ist besonders für das Studium derjenigen stationären Moränenbildungen vorgesehen, die für die periodisch zu wiederholenden Aufnahmen wenigstens vorläufig nicht mehr in Betracht fallen.

### C. Ergebnisse.

Die Ergebnisse der stereophotogrammetrischen Aufnahmen von 1932 und 1934 im Maßstab 1 : 10 000 (Aequidistanz 10 m) sind im Maßstab 1 : 25 000 auf den Tafeln 1 bis 4 (nach S. 64) dargestellt.

#### Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Gletschervermessung Mattmarkgebiet) (Monte Rosa-Gruppe).

Ueber die Gletscher des Mattmarkgebietes habe ich bereits in meiner Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes<sup>1)</sup> eingehend berichtet. Ich begnüge mich deshalb an dieser Stelle mit der Bekanntgabe der Ergebnisse für die im Forschungsgebiet vorhandenen und auf ihre Massenbilanz untersuchten Gletscher.

<sup>1)</sup> Lütshg O.: Ueber Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge, S. 35—50, Zürich 1926.

**Flächenänderung der Gletscher im obern Saastal,  
vom September 1932 bis September 1934.<sup>1)</sup>**

(Nach den Planimetrierungen von Obering, A. L. Caffisch.)

Tabelle 3

Gletscher	Exposition	Fläche		Zunahme	Abnahme	In % von 1932
		1932	1934			
		km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	%
Kessjen . . . . .	NO	0,8704	0,8206	—	0,0498	— 5,7
Hohlaub . . . . .	ONO	2,8613	2,7201	—	0,1412	— 4,9
Allalin . . . . .	ONO	10,4670	10,4407	—	0,0263	— 0,25
Hangend . . . . .	O	0,3288	0,3092	—	0,0196	— 6,0
Schwarzenberg . . . . .	NNO	7,3884	7,1516	—	0,2368	— 3,2
	Σ	21,9159	21,4422	—	0,4737	— 2,2
Seewinen . . . . .	NNO	2,1370	2,1420	0,0050	—	+ 0,2
Monte Moro . . . . .	N	0,3150	0,3334	0,0184	—	+ 5,8
Thällboden . . . . .	WNW	0,4324	0,4348	0,0024	—	+ 0,6
Ofenthal . . . . .	NW	0,7542	0,7654	0,0112	—	+ 1,5
	Σ	3,6386	3,6756	0,0370	—	+ 1,0
Zusammen		25,5545	25,1178	+ 0,0370	— 0,4737	— 1,7
				Differenz = — 0,4367		

Einen zuverlässigen Einblick in die gewaltigen und ungleichen Flächenabnahmen der Gletscher ermöglicht ein Vergleich der Flächengrößen der Mattmarkgletscher aus den Siegfriedkarten, Blätter Nrn. 533, 534, 535 und 536, Revision X. *Imfeld* 1878/79 und der Karte von Prof. M. Zeller vom September/Oktober 1932, d. h. für einen Zeitraum von gut einem halben Jahrhundert (53 Jahre). Die Planimetrierungen erfolgten mit besonderer Sorgfalt für unsere Sonderstudien im Mattmarkgebiet, weshalb wir ihre Ergebnisse hier wiedergeben.

Tabelle 4

Gletscher	1878/79	1932	Differenz	Abnahme von 1878/79
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>		km <sup>2</sup>
Allalin . . . . .	11,42	10,47	— 0,95	— 8,3
Schwarzenberg . . . . .	7,86	7,39	— 0,47	— 6,0
Seewinen . . . . .	3,33	2,45	— 0,88	— 26,4
Thällboden . . . . .	0,96	0,43	— 0,53	— 55,2
Ofenthal . . . . .	0,92	0,75	— 0,17	— 18,5

Aus diesen wenigen, aber überraschend ungleichen Abnahmegrößen geht klar hervor, daß den Flächenänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher, der Ungenauigkeit der Gletscherrandzonen usw. wegen, nicht die Bedeutung zufällt, die man ihnen gerne zuschreiben möchte. Wir werden später bei der Behandlung der Massenbilanz der Gletscher auf dieses Thema zurückkommen.

<sup>1)</sup> Ueber die Genauigkeit solcher Flächenvergleichen gibt Abschnitt «Andere Verfahren zur Bestimmung der Wasserbilanz der Gletscher», S. 70, Auskunft.

### Massenberechnung der Gletscherschwankungen.

*Allgemeines.* Bei frühern Gletschervermessungen über größere Gebiete — ich denke dabei namentlich an die klassischen Arbeiten am Rhonegletscher von 1874 bis 1915<sup>1)</sup> — wurden meistens nur eine Anzahl Profile gemessen und deren Endpunkte im Gelände versichert. Bei späterer Wiederholung der Messungen ergab sich die Höhenänderung der Gletscheroberfläche als Ordinatenunterschied zwischen zwei entsprechenden Profillinien.

Im Gebiet von Mattmark besitzen wir an Stelle einzelner Profile genaue Kurvenpläne aller Gletscher. Es lag daher nahe, auch die Höhenänderungen über das ganze Gebiet darzustellen, und nicht nur längs einiger Profile. Um über die Genauigkeit der Methode möglichst rasch im Bilde zu sein, erfolgte die zweite Aufnahme, wie bereits früher vermerkt, schon nach zwei Jahren. Auf Grund der Vermessungsergebnisse der beiden photogrammetrischen Aufnahmen sind nun für sämtliche Gletscher des obern Saastales, durch Dr. A. v. Speyr, *Linien gleicher Höhenänderung* konstruiert worden.

#### **Linien gleicher Höhenänderung (Methode A. v. Speyr).<sup>2)</sup>**

Wird die zweite Aufnahme so auf die erste gelegt, daß sich die entsprechenden Vermessungs- und Netzpunkte decken, so wird für jede Niveaulinie die Lageänderung ersichtlich. Die Messung des Flächengewinnes bzw. -verlustes für jede Höhengeschicht würde nun die Berechnung der Volumenänderung des Gletschers erlauben. Bei der großen Zahl der Höhenlinien wird aber der Arbeitsaufwand viel kleiner, wenn zuerst die relativ wenigen Linien gleicher Höhenänderung konstruiert, und dann die von ihnen eingeschlossenen Flächen planimetriert werden. Die so gewonnenen Karten geben zudem Aufschluß über Ort und Größe der Höhenänderungen der Gletscheroberfläche.

Zur Konstruktion der Linien gleicher Höhenänderung wurde über die beiden Aufnahmen ein weiteres Pauspapier gelegt. Jeder Schnittpunkt einer Niveaulinie der neuen Aufnahme mit der entsprechenden Niveaulinie der alten Aufnahme ist ein Punkt der Null-Linie gleicher Höhenänderung. Bei den flachen Schnitten ist die Lage des einzelnen Punktes etwas unsicher und möglicherweise auch durch kleine Fehler der Aufnahme verfälscht. Als wahrscheinlichste Form der Linie gleicher Höhenänderung wurde nun eine einigermaßen flüssige Ausgleichskurve zwischen die Schnittpunkte gelegt.

In gleicher Weise ließ sich die Linie gleicher Höhenänderung  $\pm 10$  m aus den Schnitten der Niveaulinien der neuen Aufnahme mit den nächsttiefern der alten Aufnahme konstruieren, analog die Linien  $\pm 20$  m,  $-10$  m,  $-20$  m usw.

Die beiden Aufnahmen liegen nur zwei Jahre auseinander, so daß der größte Teil der Gletscheroberfläche Höhenänderungen unter 10 m erfahren hat. Deshalb wurden noch Linien gleicher Höhenänderung von 2 m zu 2 m bestimmt. Dafür waren die Stellen zu suchen, wo die Höhenlinien der beiden Aufnahmen um  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{3}{5}$  und  $\frac{4}{5}$  des Kurvenabstandes einer Aufnahme voneinander entfernt sind.

<sup>1)</sup> Mercanton P.-L.: Vermessungen am Rhonegletscher 1874 bis 1915. Neue Denkschriften d. Schweiz. Naturforsch. Gesellschaft, Bd. LII, 1916.

<sup>2)</sup> Herr Dr. A. v. Speyr hat sich dem Verfasser für seine Untersuchungen in uneigennützigster Weise wiederholt zur Verfügung gestellt und wertvollste Dienste geleistet, wofür ihm besonderer Dank ausgesprochen sei.

Grundsätzlich gehen die Fehler beider Aufnahmen in die Karte der Linien gleicher Höhenänderung ein. Doch werden zufällige Fehler der Höhenlinien durch die ausgleichende Führung der Linien gleicher Höhenänderung weitgehend eliminiert. Auch systematische Fehler einzelner Zonen sind kaum zu befürchten, da die beiden Aufnahmen von denselben, im Gelände versicherten Standpunkten aus gemacht, und nach denselben Kontrollpunkten eingepaßt wurden.

Ueber die kartenmäßige Darstellung der Wasserbilanz der Gletscher im obern Saastal durch Linien gleicher Höhenänderung, konstruiert von Dr. A. v. Speyr, geben die Tafeln 5 und 6 (zwischen den Seiten 70 und 71) ein anschauliches und klares Bild. In kaum überbietbarer Deutlichkeit gelangt in diesen Kurvenbildern die große Mannigfaltigkeit der Maßenänderungen nach Größe, Lage und Form, vor allem im Firngebiet, zum Ausdruck. Der bewegte Verlauf der Linien gleicher Höhenänderung zeigt deutlich, daß auch in der relativ ebenen Firnlandschaft sich recht verschiedenartige Schnee- und Firngebilde zu entfalten vermögen (Aufwulstungen, Faltenbildungen großen Ausmaßes, Schneeanhäufungen am Fuße von Steilböschungen, hervorgerufen durch Schneerutsche, Lawinen usw., Trichterbildungen, kegelförmige Auswüchse usw.). Nicht außer acht zu lassen ist ferner, daß die dem Firn durch den Wind zukommenden Schneemengen recht verschiedenartig fallen und angehäuft werden; um dies zu verstehen, braucht man nur *einen* Hochgebirgssturm erlebt zu haben. Eine weitere wichtige Rolle fällt der formbildenden Wirkung der *Schneerosion*, hervorgerufen durch den Wind (mechanische Erosionsformen) zu; ihr wurde bis heute viel zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Auch der sommerliche Schmelzprozeß wirkt stark formverändernd auf die Firnoberfläche ein (ungleiche Besonnung, Rückstrahlung usw.), und zwar nicht nur direkt, sondern auch durch das ungleich starke Eindringen des Schmelzwassers in den Schnee und Firn, durch die auflösende Tätigkeit des abfließenden Schmelzwassers (ungleiche Lösungsformen als Folge der verschiedenartigen Struktur der Firnmassen). Nicht zu vergessen sind die Formänderungen, die durch die Gestalt des Gletscherbettes und die Bewegung des Gletschers selbst hervorgerufen werden. In Betracht fällt ferner die teils erodierende, teils auflösende Tätigkeit der von den Talhängen den Randklüften zueilenden Schmelz- und Quellwasserbäche (Bildung von Randseen).

Alles in allem erkennen wir, daß eine ganze Reihe von Faktoren, zu denen sich noch das ungleiche Eintreten der einzelnen Vorgänge nach Zeit und Wirkung gesellt, den unregelmäßigen Verlauf der Linien gleicher Höhenänderung bedingen und verständlich machen. Eine sehr dankbare Aufgabe, auf die hier nur kurz hingewiesen werden soll, betrifft die Gegenüberstellung derselben Höhenstufen bei sämtlichen Gletschern. Eine solche Untersuchung erfordert allerdings einen längeren Zeitraum als der in Betracht gezogene von 1932/1934.

## **D. Andere Verfahren zur Bestimmung der Wasserbilanz der Gletscher.**

### **1. Allgemeines.**

Für die Berechnung der Volumenänderung eines Gletschers in einem bestimmten Zeitraum kann auch die bisher bei *Deltavermessungen übliche Methode* angewendet

werden.<sup>1)</sup> Sie setzt zwei Karten des Gletschers zu Beginn und am Ende der Untersuchungsperiode mit Aequidistanz von 10–20 m voraus. Durch Planimetrierung der Höhenkurven werden für beide Aufnahmen die Flächen für Höhenstufen von mindestens 20 m bestimmt. Ihre Addition von oben nach unten führt zu den *hypso-graphischen Kurven* der beiden Aufnahmen. Trägt man die Differenz dieser beiden Kurven von einer vertikalen Null-Linie aus für jede Höhe auf, so erhält man die *Differenzlinie der hypso-graphischen Kurven*, die die Gletscherakkumulation oder die Gletscherablation im Mittel jeder Höhenstufe anschaulich darstellt.

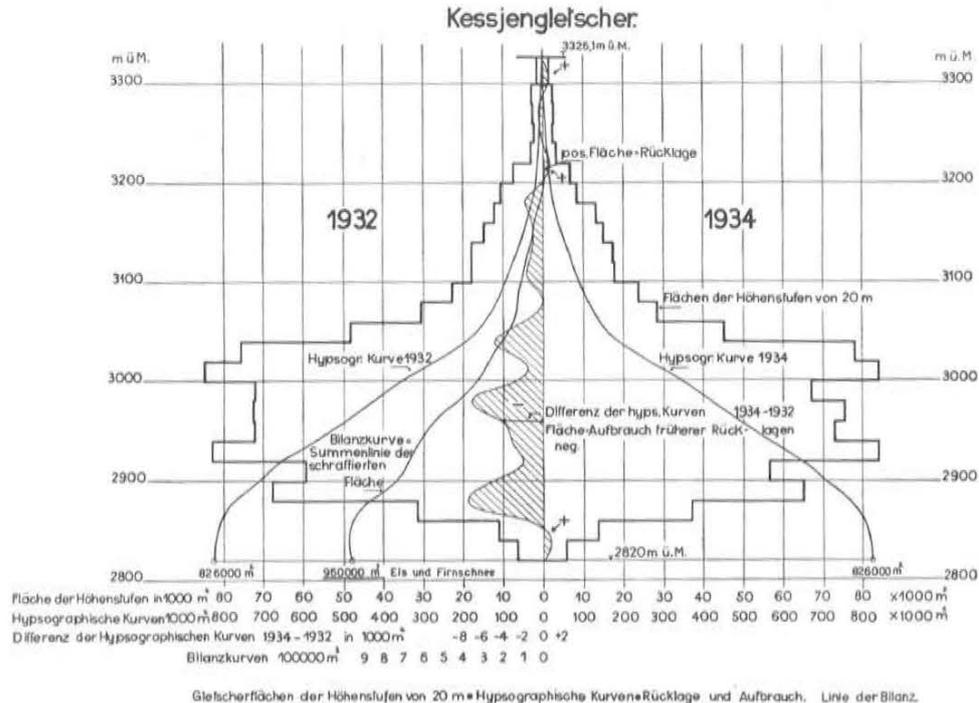


Fig. 16.

Mit Hilfe der den hypso-graphischen Kurven entnommenen Flächen des Gletschers können nun die Volumina zwischen je zwei Höhenkurven des Gletschers berechnet werden. Die Addition dieser Volumina, von oben beginnend bis zu einer beliebigen Höhe  $H$  des Gletschers, liefert das über der Höhe  $H$  liegende Gesamtvolumen im Zeitpunkt der Aufnahme. Vergleicht man diese Gesamtvolumen für gleiche Höhe  $H$  am Anfang und Ende des betrachteten Zeitraumes miteinander, so stellt ihre Differenz die Zu- oder Abnahme des Gletschervolumens oberhalb der Höhe  $H$  dar. Zeichnet man diese Differenz in Funktion der Höhe  $H$  auf, so entsteht die *Bilanzkurve* für den untersuchten Zeitraum, deren Endwert die gesamte Zu- oder Abnahme des Gletschers im betrachteten Zeitraum in Kubikmeter Schnee, Firn und Eis darstellt. Für die Wasserbilanz sind die einzelnen Teilvolumen noch mit den zugehörigen mittleren Wasserwerten zu multiplizieren (vgl. Fig. 16).

<sup>1)</sup> Vgl. Stumpf W.: Methode der Deltavermessungen der Abteilung für Wasserwirtschaft, Annalen der Schweiz. Landeshydrographie, Bd. II, Bern 1916.

Bei der Auswertung der Gletschervermessungen im obern Saastal hat sich gezeigt, daß die Genauigkeit der Bilanz sehr stark von den für die Planimetrierung gewählten Grenzen des Gletschers abhängig ist. Planimetriert man die Gletscherflächen nur bis zu den sichtbaren, auf den Karten vermerkten Gletscherrändern, so vernachlässigt man alle jene Teile des Gletschers, die unter Schutt und Moräne verborgen liegen. Aus einer eingehenden Untersuchung von Dipl.-Ing. Dr. E. Hoeck geht eindeutig und klar hervor, daß die Verwendung der auf Karten festgelegten Flächengrößen für die Bestimmung der Bilanz von Gletschern zu ganz falschen Schlüssen führen kann. Dies trifft natürlich erst recht zu, wenn es sich nur um so kurze Zeitspannen handelt, wie in unserm Fall (zwei Jahre). Besondere Erwähnung verdient an dieser Stelle, daß bei den Gletschern im obern Saastal in den Jahren 1932/34 einer Volumenzunahme eine Flächenabnahme und umgekehrt entsprach.

Bei der Ermittlung der Volumenänderung der Gletscher muß man deshalb unter allen Umständen mit der Planimetrierung der Flächen so weit hinausgehen, daß sich alle Volumenänderungen, Bewegung des Schuttes und der Moränen innerhalb der gewählten Grenzen abspielen. Die Grenze ist also mindestens so weit hinauszuschieben, bis die Höhenkurven der beiden Aufnahmen miteinander übereinstimmen. Volumenzunahmen an einer Stelle, die auf Gesteinsverschiebungen zurückzuführen sind, also für die Bilanz nicht in Frage kommen, werden dann automatisch durch eine entsprechende Volumenabnahme an anderer Stelle kompensiert. Nur auf diese Weise kann die gesamte Veränderung des Eisvolumens, und zwar auch des unsichtbaren Teils, erfaßt werden.

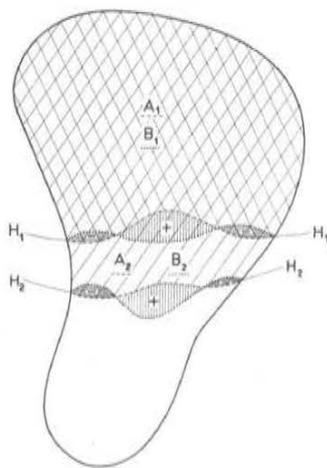
Beide Aufnahmen des Gletschers sind also bis zu ein und derselben Grenze zu vermessen. Man geht deshalb am besten so vor, daß man eine der Aufnahmen auf Pauspapier aufzeichnet und durch direkten Vergleich mit der andern Aufnahme diejenige Grenze feststellt, außerhalb der die Höhenkurven beider Aufnahmen übereinstimmen. Sodann planimetriert man beide Gletscher bis zu dieser Grenze. Ist mit einem Papierverzug zu rechnen, so ist es vorteilhafter, nach ungefähre Feststellung dieser Grenze das ganze Gebiet durch einen Polygonzug gerader Linien zu umrahmen und diesen etwas größern Polygonzug als Grenze zu betrachten. Dieser Polygonzug kann mit Hilfe der Schnittpunkte mit dem Koordinatennetz der Karte leicht und genau auf die andere Aufnahme übertragen werden, wobei man für jede Aufnahme ihren besondern Maßstab berücksichtigen kann.

Geben wir uns nun Rechenschaft über die *Genauigkeit* dieses Verfahrens. Die Veränderung des Gletschervolumens wird bestimmt als Differenz zweier Volumens, die um ein Vielfaches größer sind, d. h. also als Differenz zweier ungefähr gleich großer Zahlen, was bei großen Gletschern zu ungenauen Resultaten führen muß. Nehmen wir als Beispiel einen Gletscher mit einer Grundfläche von  $10 \text{ km}^2$  und einer Höhe von  $2000 \text{ m}$  (ungefähr die Verhältnisse des Allalingletschers), dann ist das Gesamtvolumen dieses Gletschers (roh als Kegel berechnet)  $= \frac{1}{3} \cdot 10,2 \cdot 10^9 = \text{ca. } 7,10^9 \text{ m}^3$ . Hat man nun bei der Ermittlung dieses Gesamtvolumens einen Fehler von  $1 \text{ ‰}$  gemacht (Fehler des Planimeters, Papierverzug, ungenaue Planimetrierung usw.), was noch eine hohe Genauigkeit bedeutet, so weist das berechnete Gesamtvolumen für jede Aufnahme einen Fehler in der Größenordnung von  $7,10^6 = 7 \text{ Mill. m}^3$  auf. Bei der Differenzbildung der beiden Volumens können sich diese Fehler noch

addieren, so daß der Gesamtfehler 14 Mill. m<sup>3</sup> betragen kann. In den Jahren 1932/34 änderte sich aber das Volumen des Allalingsletschers um nur 0,6 Mill m<sup>3</sup> (nach der Berechnung Dr. A. v. Speyrs). Das vorliegende Verfahren ist also, wenigstens für große Gletscher und Zeiträume mit kleinen Massenänderungen, in dieser Form nicht geeignet.

## 2. Direkte Messung der Zu- oder Abnahme des Gletschers (Methode E. Hoeck).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Veränderung des Gletschervolumens direkt zu messen, ohne auf die Gesamtvolumen zurückgehen zu müssen. Eine solche Methode ist z. B. die Methode der Linien gleicher Höhenänderung (Methode A. v. Speyr). Es besteht aber auch die Möglichkeit, das bisher bei Deltamessungen übliche Verfahren direkt auf die Differenz der beiden Gletscherflächen anzuwenden.



Grenzen des Gletschers.

Fig. 17.

Nach der Figur 17 ist:

$A_1$  = Gesamtfläche des Gletschers oberhalb der Höhe  $H_1$  der 1. Aufnahme;

$B_1$  = entsprechende Fläche der 2. Aufnahme;

$A_2$  = Gesamtfläche des Gletschers oberhalb der Höhe  $H_2$  der 1. Aufnahme;

$B_2$  = entsprechende Fläche der 2. Aufnahme;

$h = H_1 - H_2 =$  Aequidistanz.

Das Volumen des Gletschers zwischen den Horizonten  $H_1$  und  $H_2$  ist:

für die 1. Aufnahme  $V_1 = \frac{1}{2} (A_1 + A_2) h$ ;

für die 2. Aufnahme  $V_2 = \frac{1}{2} (B_1 + B_2) h$ .

Der Zuwachs des Gletschervolumens zwischen den Horizonten  $H_1$  und  $H_2$  entspricht der Differenz

$V_2 - V_1 = -\frac{1}{2} (A_1 + A_2) h + \frac{1}{2} (B_1 + B_2) h$  oder

$V_2 - V_1 = [\frac{1}{2} (B_1 - A_1) + \frac{1}{2} (B_2 - A_2)] h$   
 $= \frac{1}{2} (f_1 + f_2) h$ ,

wobei  $f_1 = B_1 - A_1$  die Differenz der Flächen im Horizont  $H_1$  der beiden Aufnahmen, und  $f_2 = B_2 - A_2$  die der Flächen im Horizont  $H_2$  bedeutet.

Um den Volumenzuwachs des Gletschers zu bestimmen, braucht man nur die Flächen  $f_1$  und  $f_2$  zwischen den entsprechenden Höhenkurven der beiden Gletscheraufnahmen zu planimetrieren, wobei bezüglich der Grenzen das schon früher Niedergelegte gilt. Diese Planimetrierung führt zu genaueren Resultaten, weil die Flächen  $f$  direkt gemessen werden. Addiert man schließlich die so bestimmten Volumen, so ergibt sich die Gesamtbilanz für die Gletscherablation oder -akkumulation. Will man auch bei diesem Verfahren die hypsographischen Kurven, ihre Differenzlinie und die Bilanzkurve graphisch darstellen, so muß allerdings auch noch eine der beiden Gletscherflächen zwischen den einzelnen Höhenstufen planimetriert werden. Damit wird eine hypsographische Kurve und die Differenz beider hypsographischen Kurven bekannt und alle Elemente können bestimmt werden.

Stimmen die beiden Gletscherflächen im Maßstab nicht genau überein, so besteht auch hier die Möglichkeit, jede der beiden Gletscherflächen durch einen Po-

lygonzug zu umrahmen. In diesem Polygonzug kann für jede Höhenkurve eine geradlinige Basis gewählt werden, die in beiden Aufnahmen eingetragen wird. Diese Basislinie ist dann nur so zu wählen, daß die Fläche zwischen der Basislinie und der Höhenkurve nicht zu groß wird. Die gesuchte Differenzfläche ergibt sich dann als Differenz zweier kleiner Flächen.

#### Kritik dieser Methode.

1. *Vorteile:* Die Differenzen der beiden Aufnahmen werden direkt gemessen, sind also zwischen je zwei Höhenkurven so genau, als sich die Planimetrierung durchführen läßt. Die Summe aller Differenzen wird noch genauer, weil sich bei der Addition positive und negative Fehler z. T. aufheben. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, daß sich die Planimetrierung auf die ursprünglichen topographischen Aufnahmen stützt. Sie hat damit einen Vorteil gegenüber der Methode der Linien gleicher Höhenänderung, die sich auf sekundär konstruierte Linien stützt, die stellenweise mehr oder weniger genau abgeschätzt werden müssen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dieser Methode ergibt sich in Gletschergebieten, deren Aenderungen sich innerhalb der Aequidistanz abspielen, wo also nur eine Linie gleicher Höhenänderung resultiert und die mittlere Höhe der Ablation oder Akkumulation geschätzt werden muß, wie z. B. beim Keßjengletscher 1932/34, wo sich nur zwei Höhenlinien ergeben. In solchen Fällen kann sich die vorliegende Methode auf sämtliche Höhenlinien stützen, ist also genauer.

2. *Nachteile:* Die elegante graphische Detaildarstellung der Ablation und Akkumulation, wie sie die Methode der Linien gleicher Höhenänderung ergibt, geht verloren. Wenn eine graphische Darstellung überhaupt angestrebt wird, dann muß bei der vorliegenden Methode auch noch die Planimetrierung der einzelnen Höhenstufen einer der beiden Aufnahmen erfolgen, sofern man sich nicht mit der Darstellung der Differenz der hypsographischen Kurven und der Bilanzlinie begnügen will. Das Verfahren erfordert also, wenn man alle Elemente darstellen will, viel Planimetrierarbeit.

### III. Schluß.

Wir haben gesehen, daß die zahlenmäßige Klarstellung der Vorratsänderungen innerhalb kurzer Zeitabschnitte (Monate und Jahre) im Wasserhaushalt vergletscherter Gebiete wohl mit einem erheblichen Aufwand an Arbeit und Geldmitteln verbunden ist, aber durchaus im Bereiche des Möglichen liegt. Erst mit Hilfe der Beziehungslinien zwischen Niederschlag und Abfluß für eine Reihe von charakteristischen Gletschergebieten lassen sich die Zusammenhänge zwischen Gletscherschwankung und Witterungscharakter klären; nach Ablauf einer Reihe von Jahren wird man dann in der Lage sein, die Beziehungen zwischen Gletscher- und Klimaschwankung aufzudecken und zu formulieren. Liegen einmal einwandfreie Beziehungslinien für eine ganze Reihe von charakteristischen Gletscherlandschaften vor, dann wird sich mit der Weiterführung der jährlich wiederkehrenden Messungen die gewünschte Klärung aller Vorgänge bei den Gletscherschwankungen erzielen lassen.

## 5. KAPITEL.

# Beobachtungen über das Verhalten des vorstoßenden Obern Grindelwaldgletschers im Berner Oberland.<sup>1)</sup>

Veröffentlichung der Schweizerischen Gletscherkommission.

(Hierzu die topographischen Karten des Zungengebietes des Obern Grindelwaldgletschers aus den Jahren 1919, 1925 und 1932, Tafeln 7, 8 und 9.)

### I. Einleitung.

Gebiete glazialer Erosion und Denudation sind vornehmlich an Regionen überwiegenden Schneefalles gebunden. Es ist demnach die Verteilung des Niederschlages auf die Erde, die vor allen andern Umständen für die Gestaltung der Landoberfläche maßgebend ist, ein rein *klimatischer* Faktor. Das Klima der Erde aber zeigt Schwankungen — es wechseln Perioden naßkalter und trockenheißer Jahre ab, so daß die Gebilde glazialer Tätigkeit, entsprechend der Witterung und dem Klima, in Ausdehnung und Bewegung Aenderungen zeigen, die weit über die heutigen Grenzen hinausreichen und sich erhalten haben, trotzdem sie schon lange den fluvialen Einflüssen ausgesetzt sind.

Ueber den Einfluß der Gletscher auf die Bodengestaltung gehen die Meinungen der Gelehrten weit auseinander. Jeder Untersuchung, die der Aufhellung dieser Frage dient, kommt deshalb besondere Bedeutung zu. Die folgenden Blätter verfolgen den Zweck, frei von allen Parteiansichten, die auch in dieser Frage sich feindlich gegenüberstehen, eine Darstellung der bisher auf diesem Gebiet in der Schweiz auf experimentellem Wege gewonnenen Ergebnisse zu geben.

Die Einwirkung der Gletscher auf den Boden ist eine doppelte: einerseits tragen sie durch Abschürfung die Bodenoberfläche ab (mechanische Erosion), andererseits häufen sie das fortgeschaffte Material an andern Stellen wieder an, sie akkumulieren. Beide stehen in einem gewissen Verhältnis zueinander. Unter Glazialerosion verstehen wir sowohl die mechanische Abnützung der Unterlage, als auch den Massentransport. Während über den letztern Faktor keine Widersprüche in Fachkreisen bestehen, sind hinsichtlich der mechanischen Abnützung noch scharfe Gegensätze vorhanden über die Art und den Betrag ihres Wirkens, d. h. die Meinungsverschiedenheit beschränkt sich heute auf den Grad der Erosionsfähigkeit der Eisströme. *Penck* und seine Anhänger redeten der Glazialerosion in großem Format das Wort.

<sup>1)</sup> Ein vorläufiger Bericht über diesen Gegenstand erfolgte als Mitteilung Nr. 1 der Gletscherkommission der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft in den Verhandlungen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, 113. Jahresversammlung in Thun, 1932, S. 320—322. Aarau 1932.

*Alb. Heim* dagegen, wohl der bedeutendste Vertreter dieser Richtung, suchte mit allem Aufwand seiner bestechenden Dialektik ihre Unmöglichkeit nachzuweisen, trotzdem seine Gegner in ihren Ansprüchen wesentlich bescheidener geworden waren. Von den Schweizer Forschern, die in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts die Ueberwachung der Gletscher für den Fall eines Vorstoßes zu organisieren begannen, leben heute m. W. keine mehr.

Das Bedürfnis, auf experimentellem Wege die Erosionswirkung zu messen, wurde immer dringender. Leider blieb dieses Verlangen lange Zeit unerfüllt. Die 15 Bohrlöcher, die der verdiente Berner Geologe Prof. A. *Balzer* im Jahre 1892, in Erwartung eines Vorstoßes des *Untern Grindelwaldgletschers*, auf dem vom Eis verlassenen Gletscherboden und an den Uferwandungen dieses Gletschers hat ausführen lassen<sup>1)</sup>, sind leider, trotz starkem Wachstum des Gletschers, während der letzten Vorstoßperiode bis heute noch nie vom Eise berührt worden. Ende 1927 ist der Vorstoß des *Untern Grindelwaldgletschers*, abgesehen von einer ganz kleinen Teilzunge am rechten Ufer, zum Stillstand gekommen; allgemein beurteilt, mußte er mit diesem Jahr, wie der Obere Gletscher, zu den stationären, wenn nicht im Rückzug begriffenen Gletschern gezählt werden.

Mehr Glück hatten die Gletscherforscher der verflrossenen Jahrzehnte. Das fast nicht mehr Geglaubte wurde doch einmal zur Wirklichkeit. Die Nervosität, die sich uns Glaziologen, angesichts des wirklich einsetzenden Gletschervorstoßes bemächtigte, war deshalb recht begreiflich und verzeihlich, handelte es sich doch vor allem darum, auf die bereits eingangs erwähnte, wichtige Streitfrage Licht zu werfen. Die *Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* (S.N.G.) hatte umfassende Vorbereitungen getroffen, um der Wissenschaft nichts von den Erscheinungen und Wirkungen entgehen zu lassen, die sich da den Beobachtern zu bieten versprochen. Nicht ohne tiefe Bewegung möchte ich an dieser Stelle ehrend und mit Bewunderung meines lieben, allzufrüh verstorbenen Kollegen Prof. Dr. *Alfred de Quervain* gedenken. Seine vorbereitenden Arbeiten am *Obern Grindelwaldgletscher* und seine rege Tätigkeit während des Vorstoßes selbst, haben selten schöne Früchte reifen lassen.<sup>2)</sup> Ich war in der glücklichen Lage, mit meinem Freunde *Alfred de Quervain* die beträchtlichen Aenderungen der Bewegungsverhältnisse dieses Gletschers, die sich seit 1917 vollzogen, durch zahlreiche Begehungen verfolgen zu können. Die von *de Quervain* im Vorgelände der Gletscherstirne mit Bohrlöchern versehenen Felsblöcke, sowie die vom Verfasser ebenfalls mit Bohrlöchern ausgerüsteten und genau einnivellierten Felsbänder am Westrand des *Obern Gletschers*, am Fuße des alten Moränenwalles beim Chalet Milchbach, zur Bestimmung der *schleifenden, glättenden* Erosion auf Fels, wurden durch den letzten Vorstoß mit schwerem, bis über 18 m hohem Eis und Moränenschutt zugedeckt. Eine Neu-einmessung konnte erst erfolgen, nachdem das Eis das frühere Ufergelände wieder freigegeben hatte. Dank der Rückzugstendenz des Gletschers nach 1927, stand diese

<sup>1)</sup> *Balzer A.*: Studien am Unter-Grindelwaldgletscher über Glacialerosion, Längen- und Dickenveränderung, in den Jahren 1892 bis 1897. Neue Denkschriften der Allg. schweizerisch. Gesellschaft für die gesamten Naturwissenschaften, Bd. XXXIII, Zürich 1898.

<sup>2)</sup> Vgl. *de Quervain A.*: Ueber Wirkungen eines vorstoßenden Gletschers. Beobachtungen am *Obern Grindelwaldgletscher*, Herbst 1918. Vierteljahrsschrift der Naturforsch. Gesellsch. in Zürich (Heim-Festschrift), LXIV (1919).

Möglichkeit vielleicht schon für die nächsten Jahre bevor. Dann war auch der Moment gekommen, den darüber lagernden, mächtigen Moränenschutt zu entfernen, die Felsbänder freizulegen und ihre Höhenlage neu zu bestimmen, um als Endprodukt einwandfreie Ergebnisse über die schleifende Erosionswirkung (Bodenreibung) zu erhalten.

Parallel mit den Untersuchungen am Obern Grindelwaldgletscher, führte der Verfasser auch am *Allalingletscher* im Saastal einen entsprechenden Versuch durch. Er galt der *splitternden* Erosion.<sup>1)</sup> Der Allalingletscher ist der größte des Saastales, der viertgrößte der Penninischen Alpen. Seine Fläche umfaßt 11,42 km<sup>2</sup>. Unterhalb des mächtigen Gletscherabsturzes liegt der äußerste Teil der Zunge als geschlossener, nur flach gewölbter Strom im Haupttale. In den Jahren 1917 bis 1924 erreichte und bedeckte er Felsköpfe, die jahrzehntelang zuvor eisfrei geblieben waren. Der Verfasser benutzte die Gelegenheit, um auf dem Felssporn, genannt «Auf der Schanz», Bohrlöcher anzubringen und Profile aufzunehmen, deren Höhenlage und Verlauf auf den halben Millimeter genau festgelegt wurden. Die Oberfläche dieser Felseninsel, die aus dem ehemaligen Zungenbecken heraustritt, zeigt uns Felsgrund aus Gneis mit Amphibolit. Sie ist teilweise leicht verwittert und ziemlich uneben. Die Schichten streichen hier allgemein NS und fallen mit 30—40° gegen Westen, d. h. gegen die Bewegungsrichtung des Gletschers. Die Struktur dieses Felsvorsprunges bot dem Gletscher gute Angriffslächen.

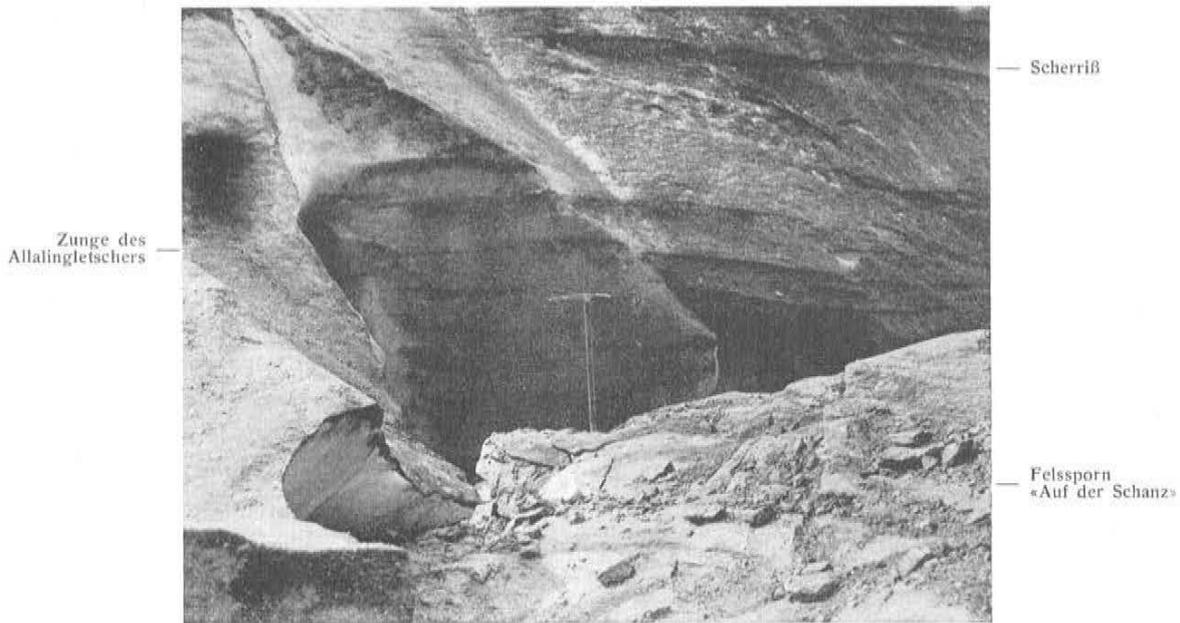
Mit dem Eintritt der letzten Vorstoßperiode um das Jahr 1912 hat sich der Gletscher diesem Felskopfe «Auf der Schanz» wieder genähert, 1917 diesen erreicht und ihn 1918 bis 1921 beinahe überflutet. Die Aufnahme der Profile erfolgte am 13. August 1919; am 26. Juli 1920 war der Felsbuckel bereits vom Gletscher zugeeckt. Die mittlere Eisbewegung im Erosionsprofil «Auf der Schanz» erreichte folgende Beträge in je 24 Stunden:

Vom August 1919 bis Dezember 1921:	6,2 cm in 24 Stunden
im Jahre	1922: 5,0 « « 24 «
« «	1923: 4,0 « « 24 «
« «	1924: 2,9 « « 24 «

Die Messung der maximalen Bewegung der Gletscherstirne in der vorliegenden Periode ergab im Juli 1920 einen Tagesbetrag von 16,7 cm, gegenüber einem Maximalbetrag am Obern Grindelwaldgletscher am 20. Mai 1921 von 53 cm. In der Achse des Allalingletschers betrug die Höhenzunahme von 1915 bis 1929 etwa 35 m.

Die anhaltende Wärmeperiode des Sommers 1921 verursachte ein gewaltiges Schwinden der Eiszunge, so daß Teile der «Schanz» erstmals zum Vorschein kamen und die Wirkung der Erosion beurteilt werden konnte. In den folgenden Jahren gab der Gletscher den Felssporn «Auf der Schanz» immer mehr frei. Eine Neuaufnahme der Profile erfolgte am 3. August 1925. Für die Beurteilung der Erosionsgröße sind die Bewegungsgrößen der Jahre 1919 bis 1921 und als Zeitraum rund drei Jahre in Betracht zu ziehen.

<sup>1)</sup> Unter *splitternder* Erosion versteht man die Abreißung und Absplitterung von Fragmenten. Für die Korrosion maßgebend ist die Gesteinsart und das Gefüge der Gesteinsschichten. Die Korrosion wird unterstützt durch Frostwirkung und Verwitterung.



8. Sept. 1926.

Fig. 18.

Photo O. Lütshg.

**Zunge des Allalingsgletschers  
auf dem Felskopfe «Auf der Schanz».**

Erosionswirkung durch Abreißen, Schaufeln, Ausbrechen und Absplittern.  
Bemerkenswert sind die auch bei diesem Gletscher am äußersten Stirnrand zahlreich und markant auftretenden Scherrisse.

*Der Mittelwert der mechanischen Abnützung auf einer Versuchslänge von 16,73 m betrug 30,1 mm, der Maximalwert 184 mm, der Minimalwert 0 mm.* Seit dieser Aufnahme hat sich der Gletscher noch weiter zurückgezogen. Mein letzter Besuch erfolgte anfangs Oktober 1927. Dabei konnten neue, mächtige Erosionswirkungen festgestellt werden; bemerkenswert ist namentlich das Ausheben eines Felsstückes der verwitterten Rinde von der Größe eines halben Kubikmeters. Der Gletscher hat ganze Arbeit geleistet. Wohl waren an den glatten Stellen des Felsbuckels nur leichte Schrammen zu erkennen, die Schleifarbeit also nicht besonders bemerkenswert, um so größer aber war die zerstörende Wirkung an den Stellen, wo er gute Angriffspunkte fand, wo nicht nur der statische, sondern auch der dynamische Druck zur vollen Auswirkung gelangen konnte. Die Erosionswirkung durch Abreißen, Ausbrechen und Absplittern war augenfällig. Das Eis, das mit vollem Druck und Gewicht auf dem Felsen lastete, schaufelte gleichsam große Stücke einfach weg; manche gesunde, auch gerundete Felspartie wies Risse auf oder wurde in Stücke zerdrückt, deren Zusammenhang leicht feststellbar war (vgl. Fig. 18).

Daß ein Teil der Wirkung auch dem Froste zugeschrieben werden muß, versteht sich von selbst. Ueber das Ausmaß sind wir im unklaren. Zusammengefaßt darf dennoch gesagt werden, daß die Erosionswirkung des Allalingsgletschers auf dem Felsporn «Auf der Schanz» recht erheblich war.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Weitere Ergebnisse siehe: Lütshg O.: Beobachtungen über das Verhalten des vorstoßenden Allalingsgletschers im Wallis, Zeitschr. f. Gletscherkunde, Bd. XIV, 1926, S. 257—265, Leipzig 1926.

## II. Die Untersuchungen am Obern Grindelwaldgletscher: Bewegung und Erosionswirkung in den Jahren 1921 bis 1928.

### A. Allgemeines.

Zur Feststellung der Felsbearbeitung am Obern Grindelwaldgletscher sind im Juni 1919, wie oben bereits angedeutet, durch die *Gletscherkommission der S.N.G.* und die *Eidg. Landeshydrographie*

- a) an verankerten, glatten *Gneisblöcken* im Vorgelände der Gletscherstirne durch Prof. *A. de Quervain*, und
- b) an *Kalkfelsbändern* am Westrand des Gletschers, am Fuße der Halsegg beim Chalet Milchbach, durch den Verfasser

20 Löcher von 15—20 cm Tiefe gebohrt worden. Tiefe und Lage der Löcher sowie die Höhenlage der Punkte und deren Verbindungslinien wurden — ich werde später darauf zurückkommen — präzise bestimmt. Die Lage der Punkte ist aus den Situationsplänen (Tafeln 7, 8 und 9, nach S. 94<sup>A</sup>), der Situationsskizze (Fig. 23, S. 91) und Bild (Fig. 24, S. 92) ersichtlich.

Die von 1913 bis 1916 langsam, von 1917 bis 1920 stark anwachsende und vorwärtsdrängende Gletscherzunge vermochte über die mit Bohrlöchern versehenen Felsblöcke und Felsbänder hinwegzugehen. Das ganze Vor- und Seitengelände wurde erst von Moräne, dann vom Eis überflutet. Mit unwiderstehlichem Drang brach der Gletscher in die Jungwälder der Talsohle ein und pflügte sie um, kräftige Bäume wurden vom Eise über der Wurzel abgeschert. Weite Strecken des alten Weges zum Gletscher wurden zugedeckt, die kleine Betonbrücke über die Lütschine vom Eise zertrümmert, das Bett der Lütschine mehrmals verschüttet, so daß sich der Gletscherbach immer wieder einen neuen Weg suchen mußte. In breiter, haushoher Front schoben sich die zerklüfteten Eismassen vorwärts, das Erd- und Steinreich schonungslos tief aufpflügend und einen großen Moränenwall vor sich herschiebend, fürwahr ein erhebendes Naturschauspiel. Und welch wunderliche Launen entwickelte das Kräftespiel dieses energischen Gletschervorstoßes! Ueber das Verhalten des Eises zum Vorgelände (Wulstungen des Bodens), zur Lütschine (Verlegung des Laufes), zu den Felsblöcken im Schutt (Zermalmen von Blöcken zwischen Eis und Stirn- moräne, Abscherungsspalten an Stellen, wo dem vorrückenden Eis Widerstand begegnete) hat uns *de Quervain* in lebendiger Sprache berichtet.<sup>1)</sup> Von den im Vorgelände im Herbst 1918 und Frühjahr 1919 mit Lochmarken versehenen sechs Blöcken konnten wir, trotz nachhaltigem Forschen, nur noch einen wieder finden, und zwar in vollständig unverletztem Zustand. Es darf wohl als sicher angenommen werden, daß die übrigen vom Gletscher erfaßt und weiter transportiert wurden oder überhaupt der Zerstörung anheimfielen. *A. de Quervain*, der sich namentlich mit dem Verhalten des vordringenden Eises zu den Felsblöcken im Schotter des Vorgeländes und zur Moräne beschäftigt hatte, wies schon in seiner Schrift<sup>1)</sup> darauf hin, daß die Wahrscheinlichkeit einer mechanischen Abnutzung bei der vorliegenden

<sup>1)</sup> *de Quervain A.*: Ueber Wirkungen eines vorstoßenden Gletschers. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellsch. Zürich, LXIV (1919).

Gestaltung und dem Gefüge der Blöcke von vornherein nicht groß ist. Seine Vermutung hat sich bestätigt.

Ueber die Beziehungen des Gletschervorstoßes zu den Klimafaktoren ist folgendes zu bemerken. Seit 1909, also seit Beginn des allgemeinen Vorstoßes, waren die Sommertemperaturen in der Schweiz, trotz den zwei warmen Sommern 1911 und 1917, durchschnittlich um  $0,6^{\circ}$  C niedriger<sup>1)</sup> als in der vorhergehenden, etwa von 1892 bis 1909 dauernden Trockenperiode des Gletscherrückzuges. Klimatisch betrachtet, ist dieser Wärmeausfall ganz bedeutend; er würde nach einer Berechnung von Prof. A. de Quervain allein schon genügen, um ein Anwachsen des Obern Grindelwaldgletschers bis zu seinem Hochstand von 1855 zu erklären. Von selbst wird man hier auf ein weiteres Element, auf den verminderten Einfluß der direkten Sonnenstrahlung geführt, der als weiterer Faktor zu beachten ist. Dazu kommt, daß das Alpengebiet im vergangenen Jahrzehnt (ab 1909), besonders im Winter, eine starke Zunahme der Niederschlagsmengen zu verzeichnen hatte. Ueberblickt man die energische Vorstoßperiode in ihrer Gesamtheit, so hat man keine andere Erklärung dafür, als daß sie durch das günstige Zusammentreffen einer Periode niedriger Sommertemperaturen, geringer Sonnenstrahlung und großer Winterniederschläge, namentlich in den Firnregionen, zustande gekommen ist.

Ueber die *Geschichte der Schwankungen* dieses Alpengletschers, der ich mich im Sommer 1921 an Ort und Stelle und in Verbindung mit meinem verstorbenen Freund Dr. W. A. B. Coolidge in Grindelwald, des Besitzers der wohl reichsten Alpenliteratur der Schweiz, gewidmet habe, gebe ich auf Seite 82 raumeshalber nur die nackten Hauptergebnisse wieder. Die Daten sind zuverlässig belegt. Sie stimmen jedoch mit den Angaben von F. A. Forel und E. Richter nicht vollständig überein, was, in Anbetracht des lückenhaften Nachrichtenmaterials, — nicht verwunderlich ist. Von einer Abgrenzung von Anfang und Ende der einzelnen Vorstoß- und Rückzugsperioden sehe ich ab, vor allem, weil das Beobachtungsmaterial dazu nicht ausreicht, da das Hauptaugenmerk der frühern Beobachter meist nur auf die Bewegungsvorgänge im Stirngebiet der Gletscherzungen, statt auf die des *ganzen* Gletschers gerichtet war.<sup>2)</sup> Die Lösung der Frage, wie sich ein Gletscher in seinem Zustande verhält, erfordert eine zahlenmäßige Behandlung des Wasserhaushaltes seines *ganzen* Einzugsgebietes. Ebenso kann der Bewegungsverlauf eines Vorstoßes in einwandfreier Weise nur durch langjährige Beobachtungen und Messungen, die sich über das *ganze Gletschergebiet* erstrecken, klargelegt werden.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Damit im Zusammenhang steht auch eine verminderte Strahlung.

<sup>2)</sup> Es gibt heute noch Forscher, die sich in ihren Gletscherbeobachtungen nur mit deren Stirne beschäftigen und geradezu mit unglaublicher Zähigkeit daran festhalten.

<sup>3)</sup> Für die jahreszeitlichen und Jahres-Schwankungen der Eisbewegung des ganzen Gletscherkomplexes fallen vor allem in Betracht: a) die meteorologischen Faktoren; b) die Gestalt des Gletschertales, des Gletscherbettes, die Rauheit der Wandungen; c) die Schwankung der Firn- und Eismassen (Höhe, Fläche, Wasserwert), wobei insbesondere die Gletscherbewegung in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen der Anhäufung von Firn und der Abschmelzung auf der Zunge verfolgt werden muß. Die Spalten haben mit dem eigentlichen Bewegungsvorgang nichts zu tun, sie sind nur hinzutretende, durch besondere Verhältnisse des Untergrundes bedingte Begleiterscheinungen der Gletscherbewegung. Zur Erklärung der rezenten Gletscherschwankungen und namentlich des eigenartigen Verhaltens unserer Gletscher seit etwa 1850 (allgemeiner Rückzug) wird gerne die Aenderung einzelner meteorologischer Elemente (Niederschlag, Temperatur, Strahlung usw.) ins Feld geführt. Für einen solchen Nachweis (wohlverstanden, zahlenmäßigen), reicht heute das vorhandene Beobachtungsmaterial, namentlich was den Niederschlag an-

## B. Die Schwankungen des Obern Grindelwaldgletschers im allgemeinen.

Der Gletscher ist, wie bekannt, in Ausmaß und Gestaltung von den wechselnden Verhältnissen der Witterung und des Klimas, vor allem — von Menge und Zustands-wandlung der Niederschlagsvorräte im Nährgebiet, von der Strahlung (Sonnen- und diffuse Strahlung) und der Temperatur im Zehrgebiet, von der Exposition, sowie von den orographischen Verhältnissen abhängig. Ueber die Gletscherschwankungen in den Schweizer Alpen im allgemeinen soll hier nicht näher berichtet werden.<sup>1)</sup> Als eine der augenfälligsten Naturerscheinungen in unserm Schweizer Hochgebirge darf der fast ununterbrochene, gewaltige Rückgang unserer Gletscher bezeichnet werden, der sich von ungefähr Mitte des 19. Jahrhunderts bis Anfang des 20. Jahrhunderts vollzogen hat. Seit Ende der 1850er Jahre bis zum Jahre 1912, dauerte dieser mächtige Gletscherschwund; Milliarden von m<sup>3</sup> Eis sind dabei verschwunden, viele Hunderte von km<sup>2</sup> Boden aper geworden. Wenn wir von der relativ bescheidenen Zahl von chronikalischen Aufzeichnungen über den Stand unserer Alpengletscher absehen, fehlen uns leider genaue kartographische, wie auch zusammenhängende, meteorologische Unterlagen für die Beurteilung solcher Vorgänge in weiter zurückliegenden Jahrhunderten. Wie sich die Verhältnisse bei einem kommenden Gletschervorstoß gestalten werden, vermochte niemand vorauszusagen, denn verlässliche Daten für ein solches Phänomen standen nicht zur Verfügung. Daß aber im 20. Jahrhundert ein Vorrücken der alpinen Eisströme, ähnlich dem in den zwanziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Bereiche des möglichen lag, stand für den Glaziologen außer Frage. Soll aber der nächstbevorstehende Gletschervorstoß das seit etwa 1855 aper gewordene Terrain auch nur einigermaßen wieder überdecken, so müssen es zweifellos *ganz bedeutende* Temperatur-, Niederschlags- und Strahlungseffekte sein, die da mitwirken, wenn anders dem stetig fortschreitenden Gletscherschwund bald Einhalt getan werden soll, hat ja selbst die bekannte, *feuchtkühle* Periode von 1878/1891 auf die Zungenausdehnung unserer großen Gletscher keinen irgendwie bedeutsamen Einfluß ausgeübt. Was allerdings in den großen Firnreservoirs in dieser Zeit vor sich gegangen ist, darüber sind wir mangels sicherer Unterlagen nicht genügend orientiert, um auch nur annäherungsweise ein Bild entwerfen zu können.

Seit Beginn der Rückzugsperiode der 1850er Jahre vermag man, an Hand des meteorologischen Beobachtungsmaterials, drei ziemlich scharf getrennte Abschnitte in Temperatur- und Niederschlagsschwankung am Nordhang unserer Alpen zu erkennen.

Erster Abschnitt: trocken warm von 1856 bis 1874, für die Temperatur bis etwa 1877.

Zweiter Abschnitt: feuchtere Periode von 1875 bis 1891, insbesondere gekennzeichnet durch den großen Ueberschuß an Nässe von 1875 bis 1882, dem später erst ein auffällig kaltes Jahrfünft von 1886 bis 1891 folgte.

belangt, noch lange nicht aus. Um Klarheit zu schaffen, muß der Einfluß jedes einzelnen in Betracht fallenden Faktors studiert werden können. Dabei kommt man ganz von selbst zur Erkenntnis, daß es sich in der Regel um ein Zusammentreffen mehrerer günstiger Nebenfaktoren handelt. Das Zufallsmoment spielt bei solchen Vorgängen eine große Rolle. Die einwandfreie Lösung dieses interessanten Problems bleibt also einem spätern Zeitpunkt vorbehalten.

<sup>1)</sup> Vgl. *Kinzl H.*: Die größten nacheiszeitlichen Gletschervorstöße in den Schweizer Alpen und in der Mont Blanc-Gruppe. Zeitschrift für Gletscherkunde, Bd. XX, Heft 4/5, 1922.

Dritter Abschnitt: Von 1892 bis ungefähr 1909 bemerkenswerte Trockenzeit, die in der denkwürdigen Hitze- und Dürreperiode des Sommers 1911 einen fast beispiellosen Höhepunkt erreichte. Auch die Temperatur blieb in dieser Periode etwas höher, doch erreichte ihre Erhebung lange nicht mehr den Grad wie in der warmen Zeit des ersten Abschnittes (1856 bis 1877).

Mit 1910 setzte abermals eine neue Phase feuchtkühler Witterung ein. Sie führte zum bekannten kurzen, aber energischen Vorstoß der Alpengletscher um 1920, an dem auch unser Grindelwaldgletscher, wie wir sehen werden, sich lebhaft beteiligte.

Die nachfolgende Zusammenstellung ermöglicht einen nähern Einblick in die Wandlungen *unseres* Gletschers.

#### Nachrichten über die Schwankungen des Obern Grindelwaldgletschers.

- 1540 Stand sehr niedrig (*Altmann Joh. Georg*, 1697—1758, und *Gruner G. S.*, 1717—1778).<sup>1)</sup>  
1575—1600 mächtiger Vorstoß.
- Um 1602 geschichtlich größte Ausdehnung.<sup>2)</sup>  
1603 Beginn des Rückzuges.  
1620 beinahe alter Höchststand von 1600.  
1661—1686 starker Rückzug.
- Seit 1700, namentlich 1703 Zunahme. Die Ausdehnung hält an bis etwa 1720.  
1720 Rückzug, hernach wiederholte Schwankungen des Gletscherstandes.  
1743 und 1748 Vorstöße, und 1768, 1769 und 1770 strenge Winter.
- Von 1768/1770—1779 außerordentliches Wachstum des Gletschers, 1777 schon ganz unten im Tal.  
1770 viel und tiefer Schnee, späte Alpfahrt.  
1788 große Ausdehnung des Gletschers.<sup>3)</sup>  
1812—1818/19 gewaltiger Vorstoß, der aber den Höchststand von 1602 nicht erreicht haben dürfte.  
1820—1822 voraussichtliches Ende des Vorstoßes, hernach kurze Rückzugsperiode.  
1830 Vorstoß.  
1840—1854 Vorstoß.
- Von 1855 Rückzug, bis 1881. (Die Dufourkarte von 1864 und die Grindelwaldkarte von *R. Leuzinger* von 1865 zeigen den Gletscher schon wesentlich kleiner als im Hochstandjahr 1854.)  
1881 Vorstoß.  
1898 Rückzug.  
1903 leichter Vorstoß.  
1910 Tiefstand. Beginn eines kräftigen Vorstoßes.  
1910—1920 kräftiger Vorstoß.  
1921—1924 langsames Vorrücken.  
1923/1924 Ende des Vorstoßes.<sup>4)</sup>
- Von 1925—1941 starker Rückzug.

<sup>1)</sup> 1540 «schmolz der Gletscher in der Sommerhitze gänzlich weg, so daß man bis in den Herbst die nackten Felsen sah, ersetzte sich aber rasch wieder».

<sup>2)</sup> Am 8. August 1603 leitet der Landvogt von Interlaken an die Regierung eine Petition um Erlassung des Bodenzinses für ein Lehen, das durch den Gletscher überdeckt worden ist. Der Zins für das vom Gletscher «überwachsene» Land soll geschenkt sein. (Entscheid Berner Manual Nr. 6. 4. Juli 1603—Januar 1604.)

<sup>3)</sup> Handkolorierte Umrißradierung von *Simon Daniel Lafond*, 1763—1831.

<sup>4)</sup> «C'est en 1923 que le glacier a fait sa dernière crue générale, faible d'ailleurs: + 1,5 m en moyenne. En avril 1924 lors du contrôle la situation était ambiguë: en moyenne il y avait retrait de 1923 à 1924 et de 2,5 m avec un abandon de terrain de 875 m<sup>2</sup>, mais le lobe gauche sous le Milchbach avait encore avancé recouvrant 470 m<sup>2</sup> là et chassant un bloc sur 21 m encore devant lui et écrasant la jeune forêt au flanc de la grande moraine déposée du Milchbach» (*P.-L. Mercanton*).



Fig. 19.

Das Zungenende des Obern Grindelwaldgletschers (Zustand am 30. September 1921)  
 vom ehemaligen Stationsgebäude des Wetterhorn-Aufzuges aus.  
 ↓ : Äußerster Stirnmoränenwall des Vorstoßes.  
 (Hochstand vom September 1924.)



Fig. 20.

Das Zungenende des Obern Grindelwaldgletschers.  
 (Hochstand vom 1. September 1919.)



Fig. 21.

**Das Zungenende des Obern Grindelwaldgletschers.**  
Zustand Ende Juli 1932 (Tiefstand).

Aus der relativ geringen Anzahl von Daten geht die große Dürftigkeit der Nachrichten und Beobachtungen über solche Bewegungsvorgänge im Lauf der Zeiten klar hervor. Ueberblickt man das gesamte, bisher gesammelte Material über die Schwankungen der Gletscher im Alpengebiet, so macht sich dieser Mangel noch deutlicher bemerkbar. Von einem klaren Einblick in die komplizierten Bewegungsvorgänge und in die Zusammenhänge zwischen Nähr- und Zehrgebiet sind wir, — wenn wir von den klassischen «Vermessungen am Rhonegletscher» ganz absehen —, trotz allen bisherigen Bemühungen, noch weit entfernt.<sup>1)</sup> Wohl eine der wesentlichsten Ursachen der Unregelmäßigkeiten im verschiedenen Verhalten der Schwankungen von Gletscher zu Gletscher, ist in der orographischen Verschiedenheit der Firnbecken begründet. Dabei kommt namentlich den morphometrischen Daten, die bestrebt sind, die Gestalt der Gletscher zum Ausdruck zu bringen, hohe Bedeutung zu (Flächeninhalt, Volumen, Randentwicklung der einzelnen Glieder des Gletschers; Gestalt des Firn- und Zungenbeckens; Gefällsverhältnisse, Längenprofile usw.). Besonderes Gewicht ist auf die Feststellung der Durchflußprofile zwischen dem Firnbecken und dem Zungenbett, hinsichtlich ihrer Ausdehnung und Gestalt, zu legen.

Mit der Gestalt des Firnbeckens steht auch dessen Retentionsvermögen im allgemeinen, und besonders für Schmelzwasser, im Zusammenhang. Je nach der Struktur, vermag der Firn mehr oder weniger Wasser aufzunehmen (Schmelz- und Regenwasser). Warme, nasse Sommer erzeugen vermehrten Druck und führen bisweilen zu lokalen, wenn nicht allgemeinen Vorstößen.

Erhöhte Aufmerksamkeit muß auch der Ernährung der Gletscher durch Verfrachtung von Schnee durch den Wind geschenkt werden. Einen hoffnungsvollen Weg zur restlosen Lösung des vorliegenden Problems ermöglicht das Verfahren der *seismischen Eistiefenbestimmungen*, das namentlich auf dem *Unteraargletscher* durch die *Schweizer*

<sup>1)</sup> Mercanton P.-L.: Vermessungen am Rhonegletscher, Neue Denkschriften der Schweiz. Naturf. Gesellschaft, Bd. LII, Zürich 1916.

*Gletscherkommission* (Prof. Dr. A. Kreis in Chur und Dr. W. Jost in Bern) mit vollem Erfolg angewendet und erprobt wurde.<sup>1)</sup> Mit Hilfe unserer engmaschigen Netze von Niederschlagssammlern in den alpinen Hochregionen und seismischen Eistiefenbestimmungen wird dann die wünschenswerte Klärung über alle Bewegungsvorgänge erzielt werden können.

In der Folge trete ich nur auf die Bewegungserscheinungen an der Gletscherstirne im Zeitraum 1921 bis 1928 näher ein. Einleitend möge kurz erwähnt werden, daß ab 1924 wieder eine neue Rückzugsphase eingesetzt hat, die bis auf den heutigen Tag andauert, die aber hier nicht weiter erörtert werden soll. Ob wir am Ende dieser Rückzugsperiode angelangt sind? Das vermag niemand zu sagen: Wohl beginnt jetzt an unserm nordalpinen Hang wieder ein vorwiegend feuchtkühler Abschnitt der Klimaschwankung, aber irgendein sicheres Maß für einen kommenden neuen Vorstoß ist vorläufig daraus noch nicht abzuleiten.

### C. Die Eisbewegung der Zunge im Zeitraum von 1921 bis 1928.

#### 1. Messung der Strömungsgeschwindigkeit.

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit des Eises diente ein Kryokinegraph, den wir von der Firma *A. Stoppani & Cie. AG.*, Bern, herstellen ließen. Der Apparat entspricht in allen Teilen dem eines Linnigraphen, nur mit dem Unterschied, daß der Draht nicht mit dem Schwimmer, sondern mit einem kompakten Teil des Eises der Gletscherzunge verbunden ist. Die Bewegung des Gletschers wurde im 1:10-Maßstab auf einer Trommel kontinuierlich aufgezeichnet. Das Instrument arbeitete tadellos. Ein unfreiwilliger Stillstand trat nicht ein. Der Verlauf der Kurven ist deshalb bis auf die im Diagramm (Fig. 22, S. 86<sup>A</sup>) mit punktierter Linie gekennzeichneten Zeiträume lückenlos. Die Bedienung und Wartung des Apparates, sowie der Beobachtungsdienst lag in treuer Obhut von *Fritz Steuri*, Bergführer in Grindelwald.

Die mannigfachen Schwierigkeiten, die sich derartigen Messungen entgegenstellten, konnten nur nach und nach, aber dann fast vollständig behoben werden. Immerhin beziehen sich die Fehler nicht auf den *Gang* der Strömungsgeschwindigkeiten, sondern nur auf das *absolute* Maß der Bewegungsvorgänge. Sie sind so gering, daß die Verlässlichkeit der Ergebnisse, sowohl im allgemeinen, wie namentlich in Einzelfragen, vielleicht mit Ausnahme des Problems der täglichen Periode der Bewegungsschwankungen, die noch einer vermehrten Aufmerksamkeit bedarf und auf die ich noch im besondern eintreten werde, zugesichert werden kann. Ueber die einzelnen Fehlermöglichkeiten ist folgendes zu sagen.

*Längenänderung des Drahtes in Abhängigkeit von der Temperatur.* Es wurde erst verzinnter Stahldraht von 0,3 mm, dann Invar draht von 1 mm Dicke verwendet. Ueber deren Längenänderung habe ich besondere Untersuchungen durchgeführt, über die ich später berichten werde. Da der Standort und der Festpunkt mit dem Wachsen und Abschmelzen der Gletscherzunge während der Untersuchungsperiode in zweckentsprechender Weise von Zeit zu Zeit, total 30mal, gewechselt werden mußte, ergaben die Aufzeichnungen des Kryokinegraphen

<sup>1)</sup> *Kreis Alfred*: Ergebnisse der seismischen Eistiefenbestimmungen auf dem Unteraargletscher. Verhandlungen d. Schweiz. Naturforsch. Gesellsch., 121. Jahresversammlung, Basel 1941, S. 99/100.

— die Holzstangen (Festpunkte) wurden später zu Vergleichszwecken im gesunden Boden verankert — auch ungleiche Fehlerergebnisse. Wenn wir in Betracht ziehen, daß mit jedem Standortwechsel des Festpunktes in der Regel andere Bewegungsvorgänge<sup>1)</sup> in Erscheinung getreten sind, ferner erwägen, daß der Draht nur annäherungsweise in die Fließrichtung des in Untersuchung gezogenen kompakten Gletscherteiles gebracht werden konnte (mit dem Vorstoß ändert sich nur zu oft seine Richtung), im weitern bedenken, daß die Bewegungsgröße, sagen wir auf einen Tag bezogen, eine recht erhebliche war, dazu den Einfluß des Windes und des Schneefalls usw. berücksichtigen, dann dürfen wir den relativ sehr geringen Einfluß, den die Längenänderung des Drahtes auf die Mittelwerte ausübt, füglich vernachlässigen.

*Sicherung des Festpunktes im Eise.* Es ist klar, daß der Sicherung des Festpunktes im Eise besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden mußte. Zu den Messungen benutzten wir altes, rundes Stangenholz von 5—10 cm Durchmesser, das jeweilen bis 2 m tief mittels Bohrung mit dem Eise verbunden wurde. Um ein Ausschmelzen im Sommer nach Möglichkeit zu vermeiden, wurden rund um das Stangenholz Tannenzweige auf den Gletscher gelegt, die tatsächlich, praktisch beurteilt, auch in den strahlungsreichsten und wärmsten Monaten ihren Zweck erfüllten. Ich habe mich bei meinen wochenlangen Aufenthalten in Grindelwald dieser Frage im besondern angenommen und kann in dieser Hinsicht beruhigende Auskunft geben. Selbstverständlich kann ich keine Garantie dafür leisten, daß ein gelegentliches Ausschmelzen nicht doch eingetreten ist. Solche Fälle sind aber zweifellos nur selten vorgekommen. Von irgendwelchem Einfluß auf den jährlichen Gang der Eisbewegung darf unter keinen Umständen gesprochen werden.

*Wahl des Aufstellungsortes für die Kryokinegraphenanlage.* Die Wahl des Aufstellungsortes war, der örtlichen Bodenverhältnisse wegen, in der Regel gegeben. Die Aufstellung des Apparatehäuschens mußte auf sicherem, leicht zugänglichem, wenn irgend möglich, auf der Höhe des Festpunktes und, auf vom Vorstoß unbeeinflussbarem Boden erfolgen. Das Häuschen wurde stets im Boden fest verankert; trotzdem hat uns der Föhnsturm vom 6./7. Februar 1926 das Häuschen umgeworfen.

## 2. Eisbewegung.<sup>2)</sup>

Die Kurven des Kryokinegraphen lassen in überzeugender Weise die charakteristischen Merkmale der Eisbewegung erkennen. Es sind dies:

- a) die *jahreszeitlichen Schwankungen* (siehe Fig. 22, wobei hervorgehoben sein möge, daß es sich dabei um 5-Tage-Mittel [Pentaden] handelt);
- b) die *tägliche Periode*;
- c) die *aperiodischen Schwankungen*.

a) *Die jahreszeitlichen Schwankungen.* Messungen, die zur Feststellung der auftretenden Bewegungsschwankungen dienen sollen, wurden zuerst von *J. Forbes* am Mer de Glace vom 21. Dezember 1844 bis 15. Mai 1845 und von *Agassiz* am Unteraargletscher vom 19. Dezember 1845 bis 11. Januar 1847 ausgeführt. Aus ihren Ergebnissen konnte in einwandfreier Weise eine jahreszeitliche Schwankung nachgewiesen werden. Aehnliche Resultate wurden von 1894 bis 1897 von *J. Stump*

<sup>1)</sup> Solche Unregelmäßigkeiten haben sich im Stirngebiet des Obern Grindelwaldgletschers auf kurze Entfernungen in unerwartet hohem Maße bemerkbar gemacht; sie sind wohl größtenteils durch orographische Verschiedenheiten des Gletscherbettes begründet.

<sup>2)</sup> Die Lösung des Bewegungsproblems der Gletscher erfordert, meiner Meinung nach, noch viele und tiefgründige Forschungsarbeiten. Sie kann nur schrittweise und vor allem auf dem Wege der Einzel- forschung, und zwar nur durch direkte, fortlaufende, jahrelange Beobachtungen an möglichst vielen, nach Lage, Größe und Gestalt ungleichen Gletschern, gefördert werden.<sup>3)</sup>

Kryokinegraphische Aufzeichnungen liefern zweifellos wertvolle Unterlagen über diese Bewegungsvorgänge, weshalb der Bau solcher Anlagen lebhaft empfohlen werden kann.

<sup>3)</sup> Vgl. *Streiff-Becker R.*: Glarner Gletscherstudien. Mitteilungen d. Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Glarus, Heft VI, 1939.

Eisbewegung am Oberen Grindelwaldgletscher vom 1. Februar 1921 bis 31. Mai 1928.

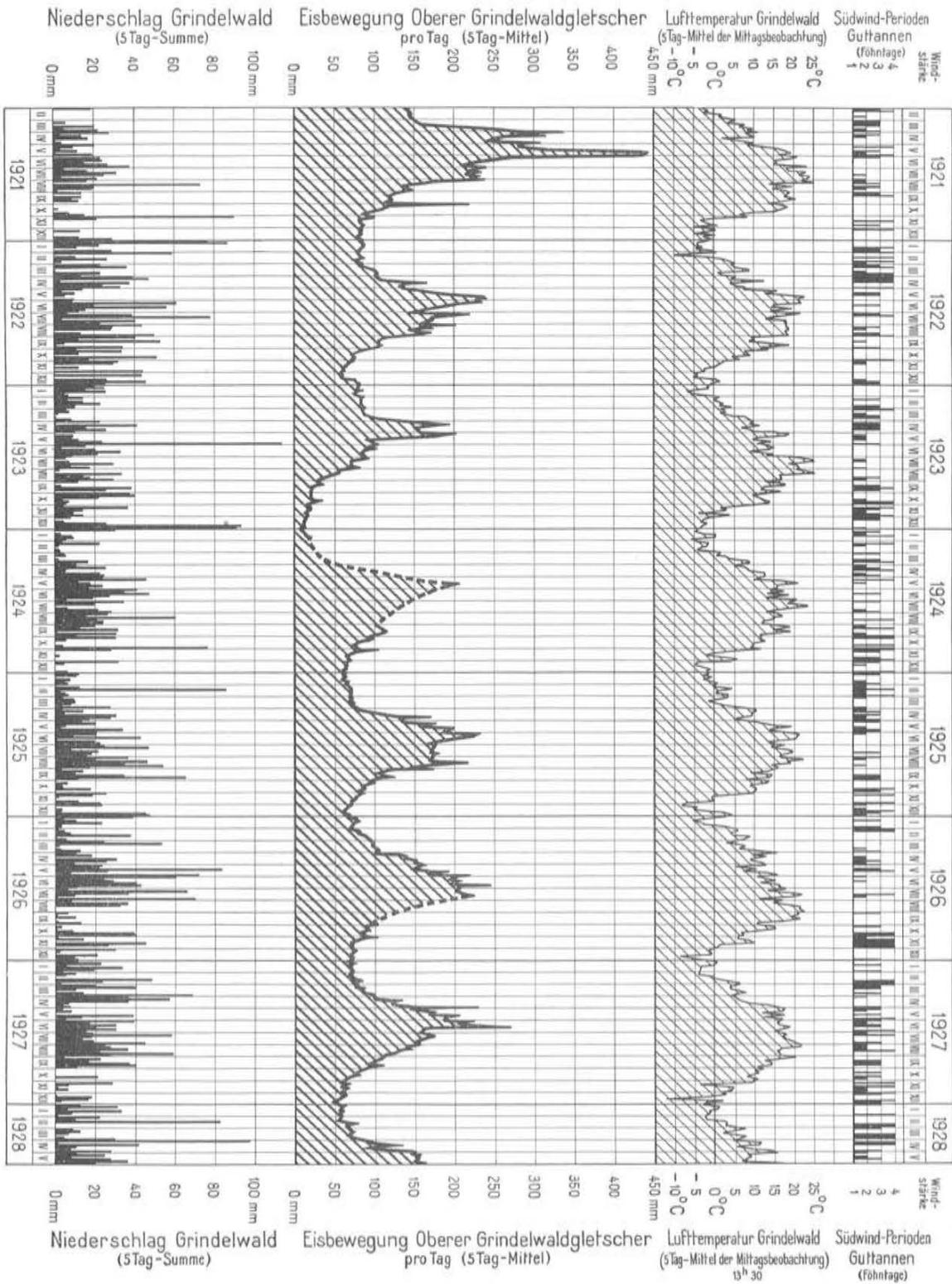


Fig. 22.



am Untern Grindelwaldgletscher, von 1887 bis 1910 am Rhonegletscher, ferner in den Rocky Mountains und auf Grönland erzielt. Einen weitem wertvollen Beitrag verdanken wir *Blümeke*s und *Finsterwalders* Untersuchungen am Hintereisferner, aus den Jahren 1900 bis 1912. Sie ergaben, daß im untern Drittel der Zunge die Sommerbewegung überwiegt, weiter hinauf aber, bis in die Nähe der Firnlinie, — die Winterbewegung.

Die Ergebnisse der *Gletscherkommission der S.N.G.* am Ende des Obern Grindelwaldgletschers von 1921 bis 1927 in 5-Tage-Mittel (Pentaden) sind in Fig. 22 graphisch dargestellt. Die Angaben für die einzelnen Pentaden zeigen sprungweise oft erhebliche Aenderungen, denen in Wirklichkeit ein noch unruhiger Charakter zukommt, weil sie im Bilde nur als Mittelwerte, d. h. in ausgeglichener Form zum Ausdruck gelangen. Sie stehen nicht nur mit der Sonnenstrahlung, der Lufttemperatur und dem Wind, d. h. mit der Witterung im Zusammenhang, also mit Faktoren, die die Ablationsgröße, die Anhäufung von Schmelzwasser im Eis und seinem Untergrunde usw. bedingen, die den Rauheitsgrad des Gletscherbettes beeinflussen, sondern auch mit der Gestalt des Gletscheruntergrundes. Diese Unstetigkeiten im Bewegungsvorgang dürfen selbstverständlich mit dem großen Vorgang der Gletscherbewegung, dem übrigens, wie wir neuerdings sehen werden, auch wellenförmiger Charakter zufällt, nicht auf gleiche Linie gestellt werden, sie wirken sich auch an verschiedenen Stellen der Gletscherstirne ungleich aus.

Die Monatsmittelwerte der Jahre 1925, 1926 und 1927, die ungefähr aus den gleichen Standorten des Festpunktes hervorgegangen sind und deshalb eine gewisse Uebereinstimmung aufweisen, sind der Tabelle 5 einverleibt worden.

**Monatsmittelwerte der Gletscherbewegung in mm/Tag,  
1925, 1926 und 1927.**

Tabelle 5

	1925	1926	1927	Mittelwert 1925/27
Januar . . .	65	76	72	71
Februar . . .	71	86	75	77
März . . . .	73	103	89	88
April . . . .	123	147	144	138
Mai . . . . .	179	179	181	180
Juni . . . . .	208	212	204	208
Juli . . . . .	176	(180)*	164	173
August . . . .	182	(152)*	137	157
September . .	125	(123)*	105	118
Oktober . . . .	92	93	77	87
November . . .	78	81	65	75
Dezember . . .	68	74	59	67
Mittelwert . .	120,0	125,5	114,3	119,9

\* Interpolierte Werte.

Das Ergebnis der vorstehenden Tabelle 5, kurz gefaßt, ist folgendes: Während der Monate Januar, Februar und März besteht ein langsames, in den Monaten April, Mai und Juni, — ein starkes Anwachsen der Geschwindigkeit. Hernach vollzieht sich eine bis Ende des Jahres dauernde, starke Abnahme der Geschwindigkeit. Daß

auch beim beweglichen Obern Grindelwaldgletscher — sei er im Vorstoß, im Rückzug oder im stabilen Zustand — der bekannte *winterliche Vorstoß* als Folge des Schubes aus dem Firn ohne Abschmelzung im Stirngebiet der Zunge vor sich geht, braucht nicht näher begründet zu werden. In den vorstehenden Werten ist seine Wirkung enthalten.

Das markante Anwachsen der Eisbewegung in den Monaten April bis Juni dürfte wohl vor allem der Zunahme der winterlichen Schneelast (d. h. dem erhöhten Druck) zuzuschreiben sein, die wie bekannt, in der Regel, im Frühjahr ihr größtes Maß erreicht. Zeitpunkt und örtliche Lage der maximalen Schneelast wechseln von Jahr zu Jahr. Auf die Frage, wie sich im jahreszeitlichen Verlauf die Geschwindigkeiten im Firn- und Zungengebiet des Obern Grindelwaldgletschers zueinander verhalten, kann mangels genügender Unterlagen nicht eingetreten werden. Auch in diesem Punkte dürfte der Eigenart jedes einzelnen Gletschers großes Gewicht zufallen.

Als weitere Faktoren kommen in Betracht: vermehrte Schmelztätigkeit im Zungengebiet, damit verbunden Schmelzwasserzufuhr von den Talhängen auf den Gletscher und in seine Spaltensysteme, was zur Bildung von Rand- und Eisseen führt, die den Vertikaldruck weiter erhöhen. Die Schmelztätigkeit vermindert den Rauheitsgrad des Gletscherbettes (Wandung und Sohle), sowie die Reibung im Innern des Gletschers. Die Struktur der Eismassen erfährt Änderungen. Zähigkeitsänderungen des Eises gelangen zur Auswirkung.

Es kann nicht genug betont werden, daß auch in der Gletscherbewegung jeder einzelne Gletscher als Individuum an sich aufgefaßt werden muß. Die bisherigen Ergebnisse zeigen mit kaum überbietbarer Deutlichkeit, daß die periodischen Phasen der Bewegung von Gletscher zu Gletscher große Verschiedenheiten aufweisen. Diese Verschiedenheiten stehen also, — ich wiederhole es, — nicht nur mit den meteorologischen Faktoren in Verbindung, sondern es macht sich auch der Einfluß der orographischen Verhältnisse in beträchtlichem Maße bemerkbar. Es hat dies zur Folge, daß die Bewegungsvorgänge der Gletscher während eines allgemeinen, größeren Vorstoßes (Zeitpunkt des Beginnes, des Endes, der Maxima usw.) nicht gleichsinnig zusammenfallen können. Auf weitere Einzelheiten einzutreten, namentlich was die Gletscherschwankungen längerer Perioden anbetrifft, halte ich für verfrüht! Die bisher ausgeführten Messungen der Eisgeschwindigkeit des Gletscherwachstums (Flächen- und Massenänderung) beziehen sich fast durchweg nur auf die Zungengebiete. Die Zahl der meteorologischen Beobachtungsstationen im Hochgebirge ist auch heute noch bescheiden. Diese beiden Tatsachen weisen darauf hin, daß für eine kritische Bearbeitung solcher Fragen das vorhandene Grundmaterial noch nicht ausreicht.

b) *Die tägliche Periode.* <sup>1)</sup> Ausgesprochene tägliche Perioden konnten in den Beobachtungsjahren 1921, 1922, 1923, 1925 und 1927 in total 65 Fällen nachgewiesen werden. Sie verteilen sich auf die Monate und Einzeljahre wie folgt:

Monate:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
	—	—	4	4	17	15	11	8	2	4	—	—	65
Jahre:	1921		1922		1923		1925		1927				Total
	29		12		9		6		9				65

<sup>1)</sup> Vgl. Mercanton P.-L.: La vitesse d'écoulement frontale du glacier a-t-elle un rythme journalier? Zeitschrift für Gletscherkunde, Bd. XXVII, 1941, S. 276 u. ff.

Um einen bessern Einblick in die in Untersuchung gezogenen Verhältnisse zu ermöglichen, sind, soweit das vorhandene Material es erlaubte, auch die Ergebnisse der Meteorologischen Station des Kurvereins Grindelwald, sowie weitere, an Ort und Stelle ausgeführte Beobachtungen und Aufzeichnungen über Lufttemperatur, Bewölkung, Niederschlag und Wind, ferner die Südwind-Perioden von Guttannen im Oberhasli zu Rate gezogen worden. Die Diagramme in Fig. 22 geben uns über den Verlauf der einzelnen Faktoren (5-Tage-Mittel, 5-Tage-Summe usw.) Aufschluß. Auf eine Wiedergabe des gesamten Materials ist verzichtet worden.

#### *Ergebnisse:*

1. Die äußere Anregung zur Bildung einer täglichen Periode scheint vor allem mit den Strahlungs- und Wärmeverhältnissen im Zusammenhang zu stehen, doch wirken zweifellos auch andere wichtige Faktoren mit, deren Feststellung weitere, eingehende Studien bedingt.

2. Ihr Auftreten und ihre Schwankung (Zeitpunkt und Ausmaß) sind, als Ganzes aufgefaßt, überaus wechsellvoll und launenhaft. Die Verteilung auf die einzelnen Monate aber weist eine bemerkenswerte Regelmäßigkeit auf, die mit der täglichen Periode der Wasserführung der Lütschine harmoniert. Die Einzelwerte untereinander und für sich, sprechen deutlich genug, weshalb auf eine weitere Erläuterung verzichtet werden darf.

3. Wohl die auffallendste und interessanteste Erscheinung ist die in die Augen springende große Zahl der täglichen Perioden zur Zeit des energischen Vorstoßes im Jahre 1921. Von 65 Perioden fallen 29 (44,6 %) allein in dieses Jahr. Die Zahl der täglichen Perioden scheint also mit abnehmendem Vorstoß auch abzunehmen. Dieses Verhalten des Gletschers weist darauf hin, daß die tägliche Periode nicht als eine lokale Erscheinung zu bewerten ist, sondern als eine solche, die mit dem eigentlichen Bewegungsmechanismus der Zunge, oder eines Teiles derselben, in Verbindung stehen dürfte. Das Maß des Einflusses eines jeden der vielen Faktoren, die die tägliche Periode bedingen, ist sehr schwer zu bestimmen. Zu deren Klarstellung braucht es ein noch umfangreicheres Material und dazu besondere Studien. Aus diesem Grunde muß ich leider auf eine ausführliche, tiefere Begründung des verschiedenen Verhaltens der täglichen Periode verzichten. Für heute genügt es, den Beweis erbracht zu haben, daß an unserm Versuchsobjekt scharf gekennzeichnete, tägliche Perioden der Eisbewegung in Erscheinung getreten sind. Sie unterscheiden sich von der täglichen Periode des Wasserstandes und der Wassermenge vor allem dadurch, daß sie bei gleichbleibenden Witterungsverhältnissen — (gleiche Strahlung und Temperatur) nicht regelmäßig, sondern nur sporadisch auftreten; im allgemeinen haben sie viel Ähnlichkeit mit dem Gang der Flutwelle eines Gewässers, deren Wellenberg und Wellental mit abnehmender Flut auch abnimmt. Mit Hilfe von weitern, langandauernden, systematischen und kontinuierlichen Aufzeichnungen großen Maßstabes wird es möglich werden, auch diesem Phänomen beizukommen. Dann wird sich bei Weiterführung und Vervollkommnung der Messungen an typischen Gletscherstirnen doch die wünschenswerte Klärung all dieser Vorgänge einmal erzielen lassen.

Aus der Fülle der Erscheinungen und zur Erhärtung des Vorstehenden greife ich noch zwei markante Beispiele heraus.

**1. Beispiel.** Vom 18. auf den 19. Mai 1921 erreichte die tägliche Periode der Eisbewegung, bezogen aus den Registrierstreifen des Kryokinegraphen, einen Betrag von 75 mm bei einem Unterschied zwischen den Tagestemperaturen im Schatten von  $10,0^{\circ}$  C. Beginn der Periode: 12 h 00, Maximum: 19 h 00, Ende: 11 h 00, Dauer: 23 Stunden.

*Einfluß von Strahlung und Wärme auf den Verbindungsdraht zum Festpunkt.* Stellen wir den ungünstigsten Fall in Rechnung, für den der Draht über die Lütschine gezogen werden mußte und eine Länge von 30 m erforderte, so ergibt die Ausdehnungsrechnung für *mattierten* Stahldraht, bei einer Temperaturdifferenz von  $10^{\circ}$  C im Schatten + einen Zuschlag zur Schattentemperatur nach *J. Maurer* von  $15^{\circ}$ , total also  $25^{\circ}$ , eine Größe von 8,2 mm. Der Amplitudenwert der Periode reduziert sich somit auf 67 mm. Für polierten Stahldraht verkleinert sich der Temperaturzuschlagsbetrag von  $15^{\circ}$  auf  $5^{\circ}$  (nach *Maurer*), die Ausdehnung somit auf rund 5 mm. Aus dieser Ueberlegung geht klar hervor, daß der Einfluß von Temperatur und Strahlung auf die Länge des Drahtes wohl das Maß der Periode beeinträchtigen, das Bestehen einer Periode aber nicht in Frage stellen kann.<sup>1)</sup>

**2. Beispiel.** Vom 21. auf den 22. Juli 1922 registrierte der Kryokinegraph bei Temperaturen zwischen  $9,3$  und  $22,3^{\circ}$  (Differenz =  $13,0^{\circ}$ ), bei wolkenlosem Himmel mit einer Drahtlänge (vernickelter Stahldraht) von 15 m, — eine Periode von maximal 18 mm, die sich mit Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf 15 mm reduziert. Beginn der Periode: 11 h 00, Maximum: 20 h 00, Ende: 9 h 00. Auch dieses Beispiel zeigt eindeutig das Bestehen einer täglichen Periode.

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß an vielen heitern und warmen Tagen sich überhaupt keine Perioden erkennbar machen. Da sich die oben verwendeten Temperaturen auf das Dorf Grindelwald beziehen und nicht auf die unmittelbare Umgebung der Gletscherzunge, dürften die wirklichen Differenzwerte wesentlich bescheidener sein.

Es verbleibt mir noch, auf die wertvollen Versuche hinzuweisen, die Prof. Dr. *H. Kinzl* an der Pasterze ausgeführt hat.<sup>2)</sup> Dabei ergab sich für die Bewegung des Gletscherendes während der Nacht — 1,96 mm/h, für jene bei Tag — 2,47 mm/h als Mittelwert, also ebenfalls eine *ausgesprochene, tägliche Periode*.

c) *Die aperiodischen Schwankungen.* Aus den Aufzeichnungen des Kryokinegraphen ergibt sich eindeutig, daß die im allgemeinen überaus regelmäßig verlaufende, durch die Schwerkraft veranlaßte Bewegung des Gletschers durch lokale, ruckartige Vorgänge unterbrochen wird. Diese ruckweise auftretenden Verschiebungen machen sich im limnigraphischen Bilde an verschiedenen Stellen der Gletscherstirne, entsprechend der Gestalt des Untergrundes, ungleichartig bemerkbar. Der Verfasser hat solche Erscheinungen bei seinen Begehungen auf der Zunge des Obern Grindelwaldgletschers wiederholt miterlebt. Die Versuchung liegt nahe, diese Art von aperiodischen Schwankungen dem Kryokinegraphen zuzuschreiben. Dies trifft in einzelnen Fällen auch zu, für die wenigen ins Auge gefaßten Beispiele aber nicht.

Neben diesen ruckartigen, in ihrem Ausmaß bescheidenen, nur wenige Zentimeter betragenden Bewegungen gelangen noch langsam vor sich gehende, ein bis drei Tage dauernde, aperiodische Schwankungen zur Auswirkung, deren Verlauf ebenfalls von Fall zu Fall recht verschiedene Diagramme liefert und zweifellos auf ähnliche lokale Ursachen zurückzuführen ist, wie die Ruckbildungen. So konnte *Fritz Steuri* am 6. April 1921 eine solche Schwankung, hervorgerufen durch Spaltenbildung, augenscheinlich beobachten.

Dem praktisch tätigen Glaziologen sind solche Diskontinuitäten der Bewegung durchaus verständlich. Die am äußern Rand der steil abfallenden Gletscherzunge

<sup>1)</sup> Die tägliche Periode ist auch dann in Erscheinung getreten, als der Gletscher sehr nahe an den Kryokinegraphen heranreichte, die Ausdehnung des Verbindungsdrahtes also keine Rolle spielen konnte

<sup>2)</sup> *Kinzl H.*: Zeitschrift für Gletscherkunde, 7, S. 205 u. f. 1920.

auf tretenden Verschiebungsklüfte weisen klar auf solche Bewegungsvorgänge hin. Ihnen kommt natürlich im *großen* Vorgang der Gletscherbewegung, — wir dürfen wohl sagen, — überhaupt *keine Bedeutung* zu.<sup>1)</sup>

Ich bin überzeugt, daß viele Unstetigkeiten im Bewegungsvorgang, wie sie uns das kryokinegraphische Bild in so eindrucksvoller Weise vor Augen führt, auf die Bildung von Bewegungsrissen (aufreißende Scherflächen) zurückzuführen sind. In der Frage des Bewegungsphänomens schließe ich mich weitgehendst den Anschauungen von *H. Philipp* an. Im Laufe der Vorstoßperiode des Oberen Grindelwaldgletschers konnte ich zu wiederholten Malen, und zwar im Bereiche der ganzen Zungenfront, frische Risse mit Ueberlagerungen feststellen (im Firagebiet fand ich keine solchen vor).<sup>2)</sup>

## D. Erosionswirkung.

### 1. Allgemeines.

Ueber die *Erosionswirkung auf dem Felsband am Westrand des Gletschers* orientieren vor allem die Längs- und Querschnitte I-II-III-IV, I-A, I-A\*, II-B, III-C, ⊕ H8-D-D\*, C\*-C\*\* und E-F der Figur 28. Die Lage der einzelnen Profile ist aus Situationsskizze Fig. 23 ersichtlich. Die schwarzen Flächen kennzeichnen die Stellen, die der vorstoßende Gletscher bearbeitet hat; sie geben zugleich über die Größe der Erosionswirkung Auskunft. Zur besseren Anschaulichkeit sind die Flächen im Vertikalmaß um das Zehnfache des Maßstabes der Längen- und Querschnitte vergrößert worden.

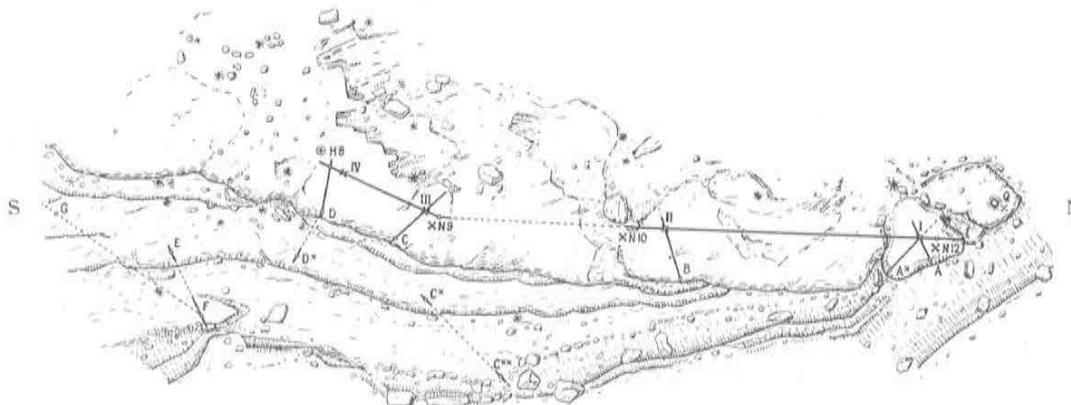


Fig. 23.

**Kalkbänder am Westrand des Oberen Grindelwaldgletschers.**  
 Situationsskizze der Bohrlöcher und ihrer Verbindungsgeraden.  
 Maßstab 1: 500.

<sup>1)</sup> Auf eine winterliche Erscheinung soll noch im besondern hingewiesen werden, weil sie dem Auge leicht entgeht: Durch das energische Vorrücken des Gletschers wurde der ihm vorgelagerte, z. T. harte und hohe Schnee gegen den Apparat geschoben. Sein Druck vermochte die ganze Anlage vorzustoßen.

<sup>2)</sup> *Philipp H.*: Gletscheruntersuchungen in den Ostalpen. Zeitschrift für Gletscherkunde. Bd. XX, Heft 4/5, Berlin 1942.

*Philipp H.*: Neuere Beobachtungen zur Mechanik der Gletscher. Petermanns Geographische Mitteilungen 1928, Heft 1—4.

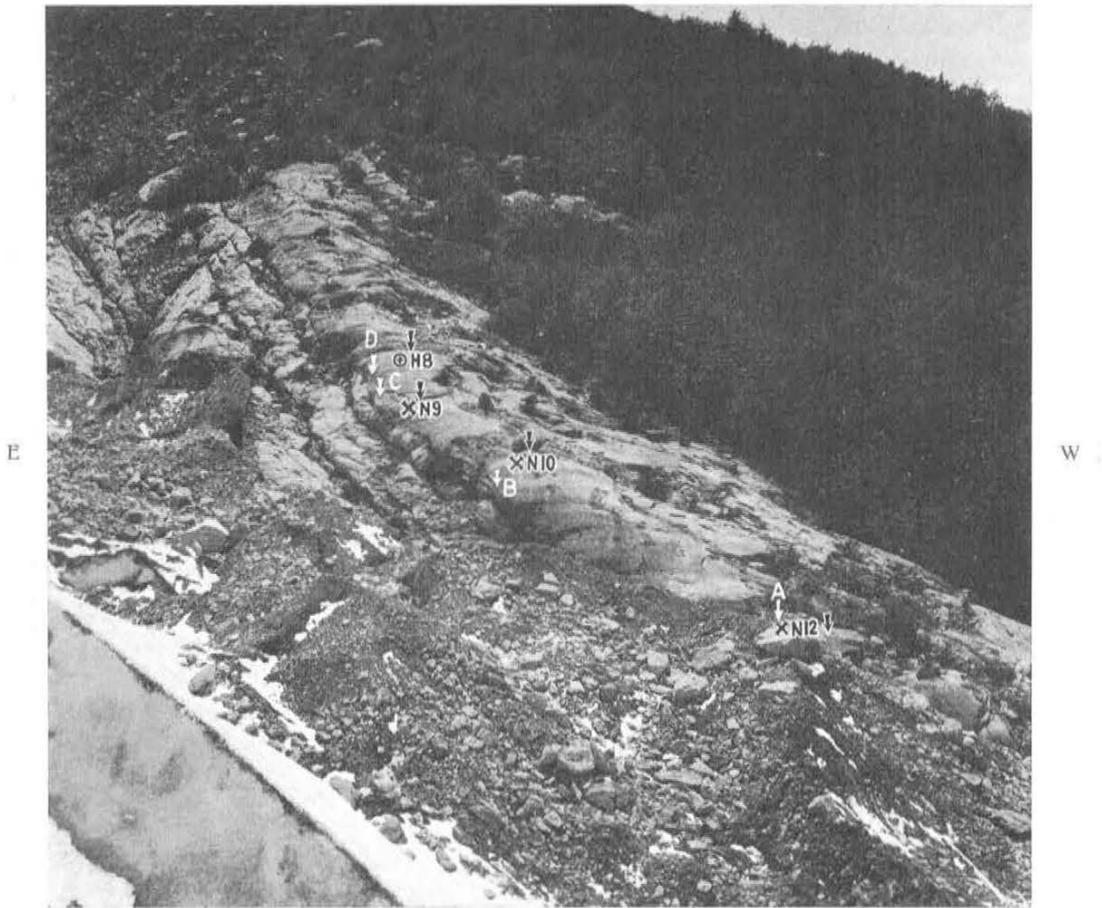


Fig. 24.

**Oberer Grindelwaldgletscher.**

Felsbänder am Westrand des Gletschers am Fuße der Halsegg beim Chalet Milchbach.  
Zustand am: 25./26. Juni 1919.  
(Vgl. Fig. 23.)

Die Bilder Fig. 24 bis 27 geben einen Einblick in die örtlichen Verhältnisse der Felsbänder vor und nach dem Vorstoß des Gletschers.

In *geologischer* Beziehung ist folgendes zu bemerken:

Nach den Notizen von Prof. Dr. *P. Arbenz* von 1919 und der Arbeit von *W. Scabell*: Beiträge zur Geologie der Wetterhorn-Schreckhorn-Gruppe (Beitr. z. Geol. Karte d. Schweiz, N.F. 57, III, 1926) und Blatt Grindelwald (Geol. Atlas der Schweiz 1:25 000, Bl. 396, Atlasblatt 13, mit Erläuterungen, 1938) deutet Prof. Dr. *P. Arbenz* das auf der Photographie (Fig. 24) und Skizze (Fig. 23) wiedergegebene Profil links am Ende des Obern Grindelwaldgletschers folgendermaßen:

1. Kompakte obere Bank, bräunlich anwitternd, mit den Fixpunkten ⊕ H8 bis × N12: Grauer bis rötlicher, spatiger Kalk mit Sandgehalt und sandigen Lagen und Flasern, in der untern Partie mit Silexknauern, unterste Partie des sogenannten Tschingelkalkes (Basis des Hauteriviens oder oberstes Valanginien).

### Oberer Grindelwaldgletscher.

Erosionswirkung auf dem Felsband am Westrand des Gletschers am Fuße der Halsegg beim Chalet Milchbach.

Linksufrige Moränenlandschaft. Die Felsbänder wurden durch den vorstoßenden Gletscher mit Moränenschutt 1—4 m hoch zugedeckt. Für die Bestimmung der Erosionsgrößen mußten die Längs- und Querschnitte der Felsbänder vom Moränenmaterial freigelegt werden. Die weißen Flächen in der Moräne sind bereits abgedeckte Teile dieser Profile.

Aufnahme v. 5. Juli 1932  
(O. Lütischg).

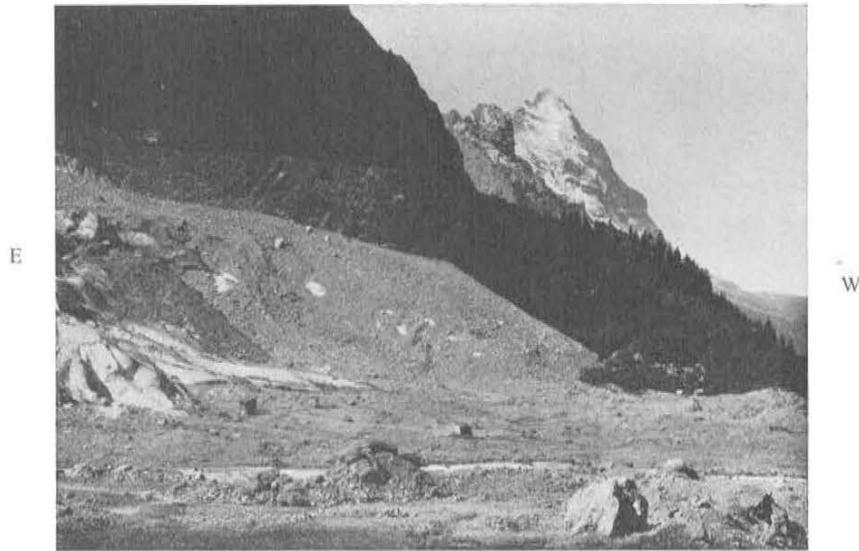


Fig. 25.

S

Linksufrige Moränenlandschaft über den Felsbändern nach dem Rückzug des Gletschers. Die Jalous zeigen die Lage des Längsschnittes xN 10—xN 12 (Fig. 26) an.

Aufnahme v. 5. Juli 1932  
(O. Lütischg).



N  
Fig. 26.



Vom vorstoßenden Gletscher über die Felsbänder geschobene Moränenwälle.

E Aufnahme v. 5. Juli 1932 (O. Lütshg).

Fig. 27.

2. Hellgrauer, feinkörniger bis grauweiß-zuckeriger Kalk, gut gebankt, mit Fossilspuren; oberes Valanginien (Scabell, S. 39, Fig. 5, S. 26, Nr. 8, 10).<sup>1)</sup>

Die Unterlage der Zunge des Oberrn Grindelwaldgletschers besteht also aus einem in den Alpen häufig auftretenden Gestein, weshalb der Befund der Glazialerosion für große Gebiete gilt.

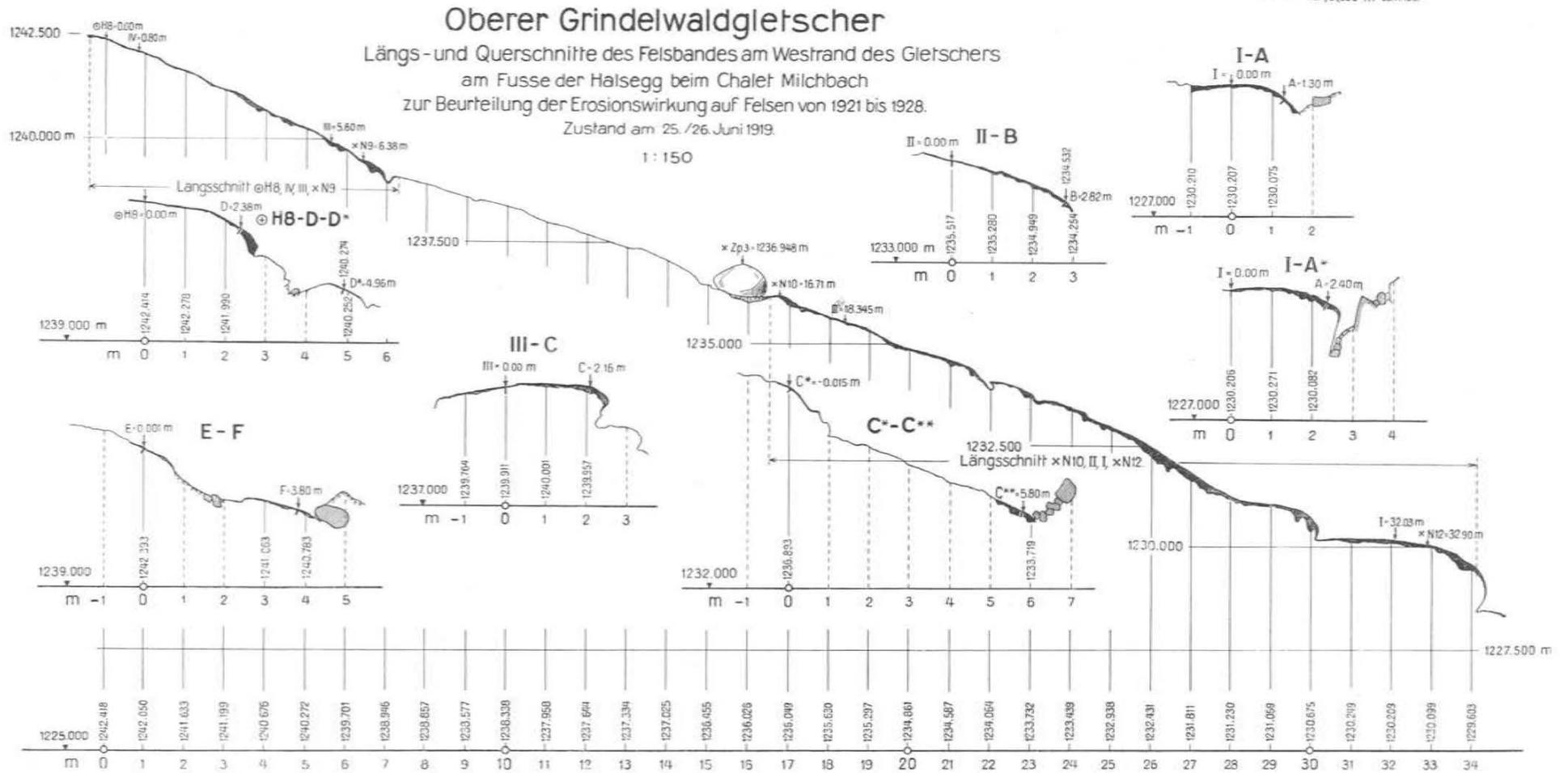
**2. Bestimmung der Lage und Tiefe der Bohrlöcher,  
sowie der Höhenlage ihrer Verbindungslinien (Längs- und Querprofile).**

Die Bestimmung der Lage und Tiefe der Bohrlöcher, sowie die Aufnahme der Erosionsprofile erforderte größte Aufmerksamkeit und peinlichste Genauigkeit. Eine unentbehrliche Grundlage für die spätere, sichere Auffindung der Bohrlöcher zur Bestimmung der Eiserosion war die Erstellung einer genauen, topographischen Karte des Gletscherbodens. Diese Arbeit wurde im Auftrag der *Schweizer Gletscherkommission* vom 13. bis 24. Juni 1919 von Ingenieur *Erwin Schnitter* mit Hilfe eines Meßtisches ausgeführt (vgl. Taf. 7, die Originalaufnahme erfolgte im Maßstab 1:2500). Weitere Aufnahmen erfolgten auf stereophotogrammetrischem Wege

- a) von Dr. *R. Helbling* in Flums, vom 28. bis 31. Mai 1925, im Maßstab 1:5000 (sie wurde durch das Technische Büro *Leupin und Schwank* in Bern, auf den Maßstab 1:2500 vergrößert und umgearbeitet und ergab als Resultat das auf Tafel 8 wiedergegebene Kartenbild);
- b) von Prof. Dr. *M. Zeller* (Auswertung durch *J. O. Reimann*), im Juni 1932, im Maßstab 1:2500 (vgl. Tafel 9).

<sup>1)</sup> Briefliche Mitteilung von Herrn Prof. Dr. *P. Arbenz* vom 28. Oktober 1941, die auch an dieser Stelle bestens verdankt sei.

Ausgangspunkte:  $\odot$  H10 = 1249,930 m 25.VI.1919.  
 $\odot$  H9 = 1248,301 m 25.VI.1919.  
 $\times$  N13 = 1245,839 m 25.VI.1919.



Die schwarzen Flächen, die die Erosionswirkung auf den Felsbändern kennzeichnen, sind zur bessern Anschaulichkeit gegenüber den Längs- und Querschnitten um das Zehnfache vergrößert worden.

Fig. 28.

Ueber die Lage der einzelnen Profile gibt der Situationsplan Fig. 23 Auskunft. Die schwarzen Flächen kennzeichnen die Stellen, wo der vorstößende Gletscher gearbeitet hat; sie geben zugleich über die Größe der Erosionswirkung Auskunft.



Während die Aufnahmen von Ing. *Erwin Schmitter* und Dr. *R. Helbling* der Festhaltung des Tief- bzw. Hochstandes des Gletschers galten, erfolgte die Aufnahme des Kartenstückes von Prof. Dr. *M. Zeller* auf Wunsch des Verfassers, vor allem zur Feststellung der Höhe der Schuttmassen über den Felsbändern und der Veränderungen der Terrainverhältnisse im Bereiche des Vorgeländes der Gletscherzunge. Leider konnte, des schlechten Wetters wegen, das Vorgelände nicht in der wünschenswerten Ausdehnung aufgenommen werden.

Die Höhenbestimmungen erfolgten mit einem großen Zeiß-Nivellierinstrument und einer mit zwei Dosenlibellen ausgerüsteten Präzisionsmire von 3 m Länge, mit Millimereinteilung, von *Kern & Cie.* in Aarau. Um den Aenderungen der Länge des Lattenmeters mit genügender Genauigkeit folgen zu können, wurden täglich zwei- bis dreimal, mittels eines geprüften Stahlstabes mit Noniusteilung, Vergleichsmessungen ausgeführt. Das Hauptnivellement zum Ausgangsfestpunkt der Felsbänder erfolgte in doppelter, die Höhenbestimmungen der Fixpunkte und Profile im Bereiche der Felsbänder — in dreifacher Weise. Die Genauigkeit der Nivellements für die Festpunkte (Bronzebolzen und Nieten) darf mit  $\frac{1}{10}$  mm, für die Profilpunkte mit  $\frac{5}{10}$  mm bewertet werden. Die Aufnahme der Profile erfolgte in Distanzen von je 10 cm. Als Ausgangspunkte dienten die nachstehend verzeichneten Festpunkte (Bronze- und Eisenbolzen), eingelassen in einen Felsvorsprung am Ostrand des Fußweges nach dem Chalet Milchbach, etwa 100 m westlich der Felsbänder. (Ueber die Lage und Höhe dieser Festpunkte orientiert Figur 29.)

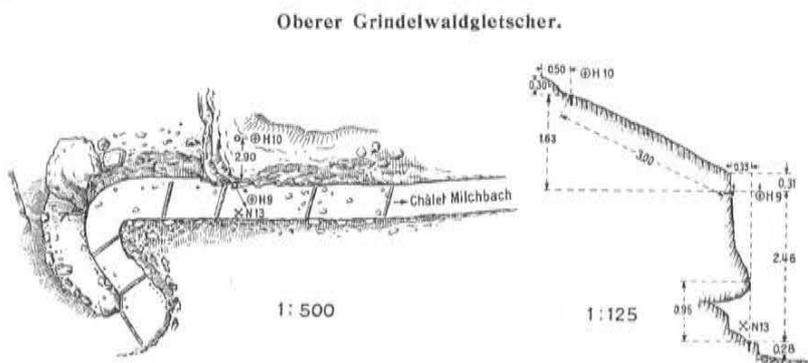


Fig. 29.

Felspartie unterhalb der Halsegg am Ostrand des Fußweges nach dem Chalet Milchbach, ungefähr 100 m westlich der Felsbänder.

⊕ H 10	Eisenbolzen in der Oberkante des Felsens, 4,37 m über dem Weg . . . . .	25. Juni 1919 1249,930 m
⊕ H 9	Eisenbolzen im Felsen, 2,74 m über dem Weg . . . . .	1248,301 m
× N 13	Niete im Felsen, 0,28 m über dem Weg . . . . .	1245,839 m

Zur genauen *Tiefenbestimmung* der Bohrlöcher wurden Messingkreuze von 100 mm Länge und 10 mm Höhe verwendet. Die Lochtiefen wurden von der Oberkante des Messingkreuzes aus gemessen, und zwar in der Weise, daß die Mitte des

Loches mit der Mitte des Kreuzes in Uebereinstimmung gebracht wurde. Das Kreuz wurde satt auf den Felsen, in der Richtung des Profils gelegt.<sup>1)</sup> Die Tiefen wurden in doppelter Weise, — nämlich mittels eines geeichten Meterstückes und einer Schublehre (Breite des Meters = 17 mm und 11 mm, der Schublehre = 12 mm, entsprechend den Durchmessern der Bohrlöcher) in getrennter Weise, grundsätzlich je fünfmal gemessen und der Mittelwert in Rechnung gestellt. Um individuelle Fehler auszuschalten, wurden die Messungen nicht nur vom Verfasser selbst, sondern auch von seinen beiden Gehilfen ausgeführt. Sämtliche Bohrlöcher wurden nach erfolgter Messung der Tiefen, mit Wachs gefüllt.

### 3. Tiefenmaße der Bohrlöcher vor und nach dem Vorstoß

(Mittelwerte).

Nr. des Bohrloches	Tiefe		Differenz
	vor dem Vorstoß	nach dem Vorstoß	
	26. Juni 1919 mm	13. Juli 1932 <sup>2)</sup> mm	
I	179,1	178,0	— 1,1
A	209,2	204,7	— 4,5
A*	208,5	203,8	— 4,7
II	223,7	221,0	— 2,7
B	216,5	211,7	— 4,8
III	214,3	208,1	— 6,2
C	218,6	208,3	—10,3
C*	214,1	213,2	— 0,9
C**	215,2	210,7	— 4,5
IV	231,5*	233,0	—
D	214,3	195,6	—18,7
D*	212,1	210,0	— 2,1
E	218,0	216,1	— 1,9
F	214,8	212,5	— 2,3
G	210,4	209,2	— 1,2

### 4. Höhenlage der Felsbänder-Profile vor und nach dem Vorstoß.

Auf eine Veröffentlichung des umfangreichen Zahlenmaterials der einzelnen, nivellierten Punkte der Felsbänder, soweit solche nicht in Figur 28, S. 94A, enthalten sind, mußten wir der hohen Kosten wegen verzichten. Wir beschränken uns auf die Bekanntgabe der Mittel-, Höchst- und Niedrigstwerte der einzelnen Profilstrecken. Ueber deren Lage sei auf Figur 23, S. 91, hingewiesen.

Zunächst die Ergebnisse der Nivellements der Festpunkte im Bereiche der Felsbänder (vgl. Fig. 24, S. 92).

<sup>1)</sup> Bei den Nachmessungen vom 13. Juli 1932 konnte der Erosionswirkungen wegen das Messingkreuz nicht immer in die Ursprungslage vom 26. Juni 1919 gebracht werden. Die Differenzwerte dürfen aber als Minimal-Erosionsbeträge aufgefaßt werden.

<sup>2)</sup> Offenbar blieben am 26. Juni 1919 bei der Tiefenmessung des Loches IV noch Gesteinstrümmer am Boden des Loches zurück, die vom Verfasser nicht beachtet wurden. Mit der Befreiung des Loches vom Wachs wurden wahrscheinlich auch diese Gesteinstrümmer entfernt. Die Nachmessung vom 13. Juli 1932 ist zweifellos richtig.

## Nivellementsergebnisse.

Tabelle 6

		25. Juni 1919	7. Juli 1932	Differenz mm
⊕ H 10	Bronzebolzen	1249,930 <sub>3</sub>	1249,930 <sub>3</sub>	—
⊕ H 9	Bronzebolzen	1248,300 <sub>8</sub>	1248,300 <sub>9</sub>	+ 0,1
× N 13	Niete	1245,839 <sub>5</sub>	1245,839 <sub>1</sub>	— 0,4
⊕ H 8	Bronzebolzen	1242,424 <sub>5</sub>	1242,423 <sub>0</sub>	— 1,5
× N 9	Niete	1239,456 <sub>6</sub>	1239,456 <sub>2</sub>	— 0,4
× N 10	Niete	1236,164 <sub>5</sub>	1236,163 <sub>3</sub>	— 1,2
× N 12	Niete	1230,123 <sub>4</sub>	1230,117 <sub>1</sub>	— 6,3

		Koten der Landes- vermessung	Koten Nivelle- ment O. Lütschg vom 13. u. 15. Juli 1932
× A	Ehemaliges Stationsgebäude des Wetterhornaufzuges, großer Felsblock, Bolzen .	1252,81 m	1252,810 <sub>0</sub> m
× B	dito Zementröhre, etwa 10 cm unter Boden . . . . .	1245,76 m	1245,768 m
× C	dito Bohrlochrand auf Lager- fels, bodeneben . . . . .	1249,84 m	1249,836 m
× P	dito Plattform, äußerste Ecke gegen den Gletscher . .	1247,81 m	1247,816 m
Br	dito Brücke über die Schwarze Lütschine, Eisenträger, lin- kes Ufer, oben, Oberkante	1210,23 m	1210,249 m
⊕ H10	Felspartie unterhalb der Halsegg, Bronzebolzen . .	—	1249,930 <sub>3</sub> m

## 5. Eisgeschwindigkeit über den Felsbändern.

Die Messung der Eisgeschwindigkeit über den Felsbändern zur Beurteilung der Erosionswirkung konnte der schwierigen Eis- und Moränenverhältnisse wegen nicht mit der selben peinlichen Genauigkeit, wie an der Gletscherfront, ausgeführt werden, die ermittelten Größen dürften immerhin als gute Annäherungswerte aufgefaßt werden. Die Messungen erfolgten in Intervallen von je einer Woche, d. h. jeweils mit dem Wechsel des Registrierstreifens im Kryokinegraphen. Auf eine Wiedergabe des gesamten Zahlenmaterials wird raumeshalber verzichtet, ich beschränke mich auf die Wiedergabe einiger charakteristischer Mittelwerte.

## Jahresmittelwerte der Eisgeschwindigkeit.

1921	rund 16,0 cm im Tag
1922	» 15,0 cm » »
1923	12,2 cm » »
1924	3,2 cm » »
1925	9,8 cm » »
1928	5,2 cm » »

Für die Beurteilung der Erosionswirkung sind die Ergebnisse der Jahre 1921 bis 1924 maßgebend, somit ergibt sich eine mittlere Eisgeschwindigkeit von 11,6 cm. Ueber die Bewegungsgrößen der vorgelagerten und unter dem Eis liegenden Moräne war es mir leider nicht möglich, zuverlässige Zahlenwerte zu erhalten. Gefühlsmäßig dürften solchen Geschwindigkeiten etwas kleinere Werte zufallen.

Im Vergleich der Eisgeschwindigkeiten über den Felsbändern zu denjenigen an der Front gelangt der Einfluß der Lage des Festpunktes im frontalen Eis markant zum Ausdruck. Mit jedem Standortwechsel änderte sich auch der Zusammenhang, d. h. die Beziehungsgerade im Koordinatennetz nimmt mit dem Wechsel eine andere Richtung an.

### 6. Ueberlagerung der Felsbänder mit Moräne und Eis.

Aus den ermittelten Höhenlagen der Felsbänder und den Kartenaufnahmen der Jahre 1919, 1925 und 1932 lassen sich die Ueberlagerungsgrößen berechnen. Die nachfolgende Tabelle 7 gibt hierüber nähere Auskunft. Auf eine Diskussion dieser Ergebnisse einzutreten erübrigt sich, da die Tabellenwerte hinreichenden Aufschluß geben.

Tabelle 7

1	2	3	4	5	6	7	8 *)
Punkt Vgl. Fig. 23, S. 91	Nivellement Dr. <i>Lütschg</i> Juli 1919	Aufnahme <i>Schnitter</i> Juni 1919	Höhen vor dem Vorstoß	Höhen Mai 1925	Eis + Moräne 1925	Höhen Juni 1932	Moräne
	m	m	m	m	m	m	m
× N 12	80,2 (1244.123) <sup>1)</sup>		1244,2	1253	<b>9</b>	1245,0	<b>0,8</b>
I	80,3	1244.4	44,3	53	<b>9</b>	46,0	<b>1,7</b>
A	79,9		43,9	54	<b>10</b>	44,6	<b>0,7</b>
A*	80,0		44,0	54	<b>10</b>	45,6	<b>1,6</b>
II	85,6	1249.7	49,6	62	<b>12</b>	51,6	<b>2,0</b>
B	84,6		48,6	62	<b>13</b>	50,2	<b>1,6</b>
× N 10	86,2 (1250.164) <sup>1)</sup>		50,2	62	<b>12</b>	52,2	<b>2,0</b>
× N 9	89,5 (1253.457) <sup>1)</sup>		53,5	66	<b>12</b>	55,4	<b>1,9</b>
III	90,0	1253.7	54,0	66	<b>12</b>	55,8	<b>1,8</b>
C	90,0		54,0	67	<b>13</b>	55,8	<b>1,8</b>
C*	87,0		51,0	67	<b>16</b>	54,2	<b>3,2</b>
C**	83,9		47,9	66	<b>18</b>	51,0	<b>3,1</b>
IV	92,2	1256.0	56,2	69	<b>13</b>	57,2	<b>1,0</b>
⊕ H 8	92,5 (1256.424) <sup>1)</sup>		56,5	69	<b>12</b>	57,2	<b>0,7</b>
D	91,8		55,8	70	<b>14</b>	56,8	<b>1,0</b>
D*	90,3		54,3	70	<b>16</b>	56,0	<b>1,7</b>
E	92,5		56,5	72	<b>15</b>	58,0	<b>1,5</b>
F	90,9		54,9	72	<b>17</b>	55,6	<b>0,7</b>

- \*) 1. Versicherte Punkte (siehe Fig. 23, 1 : 500, S. 91).  
 2. Nivellement *O. Lütschg*, Juli 1919: lokaler Höhenhorizont. (Um diese Höhen auf den Horizont P.d.N. = 387.6 zu transformieren, sind sie um 1163,93 m zu erhöhen.)  
 3. Aufnahme *Schnitter*, Juni 1919: I—IV kotiert, Horizont P.d.N. 387.6.  
 4. Aus 2 und 3: Höhen vor dem Vorstoß, Horizont P.d.N. 387.6.  
 5. Photogrammetrische Aufnahme 1 : 5000 von Dr. *Helbling*, Mai 1925: vergrößert auf 1 : 2500 und umgearbeitet auf Horizont P.d.N. 387.6 durch *Leupin* und *Schwank*. Aequidistanz 5 m.  
 6. 5 minus 4.  
 7. Photogrammetrische Aufnahme 1 : 2500 des *Photogrammetr. Inst. an der E.T.H.*, Juni 1932: Horizont P.d.N. 373.6, Aequidistanz 2 m, Höhen 7 auf Horizont P.d.N. 387.6 reduziert.  
 8. 7 minus 4.

<sup>1)</sup> Die in ( ) gesetzten Koten beziehen sich auf P.d.N. 387.6.

### 7. Erosionsergebnisse.

Mittel-, Höchst- und Niedrigstwerte der einzelnen Profilstrecken.

(Vgl. Situationsskizze Fig. 23, S. 91.)

Tabelle 8

Bestimmungsort	Länge	Erosion		
		Mittelwert	Höchstwert	Niedrigstwert
	m	mm	mm	mm
<b>Oberes Längsband</b>				
⊕ H 8 — IV — III — × N 9 . . . . .	7,00	<b>2,01</b>	<b>14,6</b>	<b>0,0</b>
Querstrecke ⊕ H 8 — D . . . . .	3,10	<b>3,84</b>	<b>39,1</b>	<b>0,0</b>
Querstrecke III — C . . . . .	3,50	<b>3,33</b>	<b>16,6</b>	<b>0,0</b>
<b>Unteres Längsband</b>				
× N 10 — II — I — × N 12 . . . . .				
Oberes Teilstück . . . . .	13,50	<b>7,26</b>	<b>27,9</b>	<b>0,0</b>
Unteres Teilstück . . . . .	3,30	<b>8,24</b>	<b>20,9</b>	<b>0,0</b>
Querstrecke II — B . . . . .	3,60	<b>2,58</b>	<b>11,1</b>	<b>0,0</b>
I — A * . . . . .	2,60	<b>7,42</b>	<b>16,2</b>	<b>2,1</b>
I — A . . . . .	2,50	<b>6,80</b>	<b>13,6</b>	<b>3,6</b>
E — F . . . . .	1,40	<b>1,99</b>	<b>5,0</b>	<b>0,0</b>

Die mechanische Abnützung der Felsbänder beim Oberen Grindelwaldgletscher erfolgte nicht wie beim Allalngletscher im Saastal durch Zertrümmerung, Ausbrechen und Abheben von Platten, Absplittern von Felsstücken, sondern fast ausschließlich durch glättende Abschleifung (Abhobeln, Raspeln, Kritzen des Felsgrundes) in der Bewegungsrichtung des in Betracht fallenden Teiles der Gletscherzunge; eine Absplittung von Fragmenten trat nur an wenigen Stellen ein.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

a) Von den sechs, von *A. de Quervain* in Gneisblöcke gebohrten Löchern im Vorgelände des Gletschers, konnten nur drei wieder gefunden werden. Eine mechanische Abnützung derselben fand nicht statt; die Lochtiefen blieben sich gleich, dagegen wurde einer der Blöcke in seiner Lage um rund 20 m vorgeschoben.

b) Die ermittelten Erosionsgrößen im Bereiche der Felsbänder dürfen natürlich nur als Einzelergebnisse bewertet werden. Sie stellen weder Minimal- noch Maximalwerte dar. So haben wir im untern Bereich der Felsbänder Felsflächen vorgefunden, wo trotz starker Ueberwucherung durch den Vorstoß des Gletschers, keine Erosionsspuren zu finden waren, an andern Orten aber, ich denke dabei namentlich an die Felswände direkt unterhalb des Chalets Milchbach, hat die Erosion auffallend hohe Beträge erreicht, die die ermittelten Höchstwerte zweifellos weit überschreiten dürften.

Die an den präparierten Versuchsstellen im Stirngebiet des Allalin- und des Oberen Grindelwaldgletschers im Berner Oberland gemessene Erosionswirkung zeigt uns jedenfalls mit aller Deutlichkeit, daß die in Bewegung befindlichen Eismassen mit Hilfe des an ihren Sohlen mitgeführten Moränenschuttes, die durchfeuchtete Felsunterlage wirksam zu bearbeiten vermögen. Die hier gemessenen Werte dürfen allerdings nicht verallgemeinert werden; jedenfalls ist dabei größte Vorsicht geboten. Für den Verfasser waren diese Resultate eine Ueberraschung, denn in beiden Fällen

handelt es sich um relativ *sehr bescheidene Kräfte*, die diese Wirkung hervorbringen vermochten. Wenn wir bedenken, wie vielfach größer die Erosionswirkungen eines Gletschers an Stellen seiner größten Dicke und schnellsten Bewegung sein müssen, wenn wir ferner erwägen, welche Ausdehnung und Mächtigkeit die Gletscher in früheren Zeiten besaßen, so dürfte wohl kein Zweifel mehr darüber aufkommen, daß die Gletschererosion bei der Formbildung des Erdreliefs als einer der wichtigsten Faktoren zu bewerten ist.

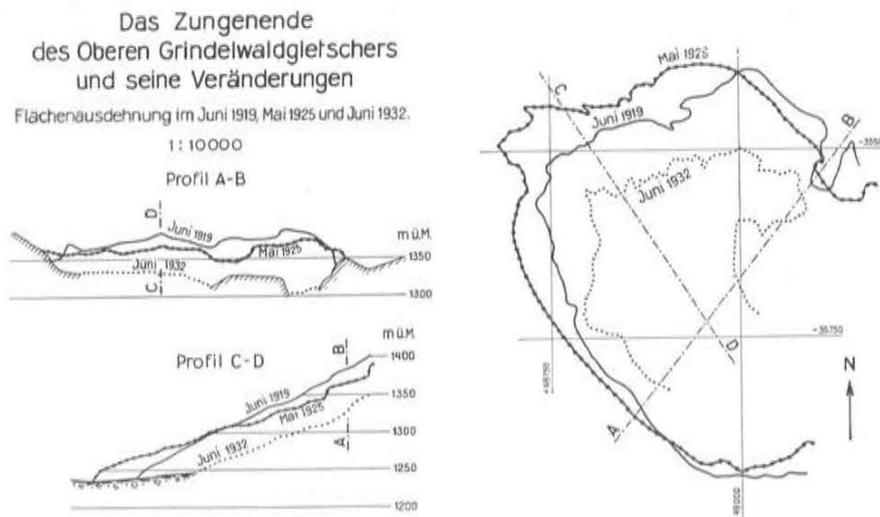
Durch die Beobachtungen und Messungen am Allalingsletscher und am Obern Grindelwaldgletscher konnten unsere Kenntnisse über die Einzelheiten des Vorganges eines Gletschervorstoßes und seine Wirkung wesentliche Förderung erfahren.

### E. Massenbilanz des äußersten Teiles der Gletscherzunge.

Die Kartenaufnahmen von Ing. *Erwin Schnitter*, Dr. *R. Helbling* und Prof. Dr. *M. Zeller* aus den Jahren 1919, 1925 und 1932 ermöglichten die Aufstellung der Massenbilanz für den untersten Teil der Zunge des Obern Grindelwaldgletschers.

Ueber die Art und Weise dieser Aufstellung mittels Konstruktion von Linien gleicher Höhenänderung (Methode *A. v. Speyr*) habe ich mich bereits bei der Behandlung des Wasserhaushaltes der Gletscher im Obern Saastale eingehend ausgesprochen (vgl. Kap. 4, II., C., S. 67 u. ff.).

Ueber die Flächenänderungen im Grundriß, Quer- und Längsprofil orientiert Figur 30.



Originalaufnahme 1: 2500.

#### Ergebnisse:

##### Flächen vor dem Querprofil A—B.

1919	9,4 ha	Mittel 1919—1925	10,6 ha
1925	11,7 ha	Mittel 1925—1932	8,3 ha
1932	4,9 ha		

Ueber die einzelnen Höhenzu- und -abnahmen dieses äußersten Teiles der Gletscherzunge geben die Figuren 31, 32 und 33 ein geradezu überwältigendes Bild. Sie zeigen uns mit kaum überbietbarer Deutlichkeit, wie kompliziert sich die Bewegungsvorgänge und der Massentransport in solchen Zungengebieten gestalten. Sie legen Zeugnis dafür ab, daß die Bewegung des Eises einen unsteten und wellenförmigen Charakter trägt, ähnlich der des Wassers in Wildwasserbetten. Die wünschenswerte Aufklärung wird auch in diesem Falle erst möglich werden, wenn wir neben der Kenntnis des Wasserhaushaltes des *ganzen* Gletschergebietes auch über die Gestalt des *ganzen* Gletscherbettes unterrichtet sind, was heute, wie bereits früher hervorgehoben, durch die Methode der seismischen Eistiefenmessungen (Prof. Dr. *Allred Kreis* und Dr. *W. Jost*) möglich geworden ist.<sup>1)</sup>

---

<sup>1)</sup> Vgl. hierüber: *Jost Wilhelm*: Die seismischen Eisdickenmessungen am Rhonegletscher 1931. Denkschriften d. Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Bd. LXXI, Abh. 2, Zürich 1936.

*Mercanton P.-L.*: Les sondages séismométriques de la Commission helvétique des Glaciers à l'Unteraar. Extrait des Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, Soleure 1936, p. 217—273.

