

**Beiträge zur Geologie der Schweiz - Geotechnische Serie - Hydrologie**  
**4. Lieferung**

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission, Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. — Arbeit aus dem ehemaligen Institut für Gewässerkunde der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

# **ZUM WASSERHAUSHALT DES SCHWEIZER HOCHGEBIRGES**

## **I. BAND**

### **II. Teil**

## **ALLGEMEINES**

### **9. Kapitel. Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen**

Herkunft – Abflußspende – Temperatur – Chemismus – Zusammenhang  
zwischen Mineralgehalt und Gesteinszusammensetzung – Mengenbe-  
ziehung zwischen Quell- und Schmelzwasser

Von

**Paul Huber F. de Quervain H. Huber**

und

**O. Lütschg-Loetscher †**

**Mitarbeiter Rudolf Bohner**

Mit 26 Textfiguren und 28 Tabellen

---

In Kommission bei Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Bern

Zürich 1950

Druck der Genossenschaftsdruckerei Zürich

Veröffentlicht mit besonderer Unterstützung der  
«Stiftung der Schweizerischen Landesausstellung 1939 Zürich für Kunst und Forschung»

Bisher erschienene Teilabschnitte des Werkes von O. Lütschg-Loetscher;

## «Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges»

(Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Hydrologie, Lieferung 4)

*I. Band, I. Teil, Erste Abteilung* (Mitarbeiter Rudolf Böhner)

1. Kapitel: Über den heutigen Stand der Niederschlagsforschung im Schweizer Hochgebirge.
2. Kapitel: Über den gegenwärtigen Stand der Abflußforschung im Schweizer Hochgebirge.
3. Kapitel: Die Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluß im allgemeinen.

*I. Band, I. Teil, 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 Oberen Grindelwaldgletschers im Berner Oberland.

*I. Band, I. Teil, Dritte Abteilung* (Mitarbeiter Rudolf Böhner, mit einem Beitrag von Hans Burger)

6. Kapitel: Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges.
7. Kapitel: Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind (Windverfrachtung) im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.
8. Kapitel: Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen im Wasserhaushalt des Hochgebirges.

*II. Band, III. Teil* (Mitarbeiter Rudolf Böhner und Walter Dietz)

Zur Hydrologie der Landschaft Davos. Forschungsgebiet Nr. 7.

*III. Band* (F. Gygax)

Niederschlag und Abfluß im Einzugsgebiet der Magliasina. Forschungsgebiet Nr. 16.

In den *Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* sind zum gleichen Thema erschienen:

Band LXXVI, Abh. 2:

Über die Verdunstungsgröße freier Wasserflächen im Schweizer Hochgebirge.

Band LXXVII, Abh. 2:

Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushaltes der obersten Bodenschicht der Schweizer Alpen.

## **Vorwort**

### **der Schweizerischen Geotechnischen Kommission**

Das vorliegende Kapitel 9 «Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen» setzt die bereits erschienenen Kapitel 1 bis 8 des Werkes von Dr. O. Lüschtg-Loetscher «Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges» fort (siehe nebenstehende Übersicht). Über die allgemeine Zielsetzung des «Wasserhaushaltes» orientiert das Vorwort des Verfassers im zuerst (1944) erschienenen Band II. Für den Stand des Werkes beim Tode von Herrn Dr. O. Lüschtg im Juli 1947 und den weiteren Fortgang der Drucklegung sei auf die einleitenden Ausführungen von Herrn Dr. R. Lüschtg und des Unterzeichneten in der Dritten Abteilung des I. Bandes verwiesen.

Einzelne Teile dieses Kapitels waren noch von Herrn Dr. O. Lüschtg in Druck gegeben worden, die andern lagen bei seinem Tode nahezu druckbereit vor. Für die Bearbeitung von Teilgebieten waren vom Autor selbst verschiedene Mitarbeiter zugezogen worden, die ihre Abschnitte größtenteils selbständig abfaßten. Herr Dr. Paul Huber, Chemiker, Vevey, führte die mühevollen Analysenreihen der Gletscherwässer durch und ist Autor des Abschnittes VI «Chemismus». Von den Herren Dr. H. Huber und Dr. F. de Quervain stammt der Abschnitt VII «Über einige Zusammenhänge zwischen dem Mineralgehalt von Winterwässern der Gletscher und der Gesteinszusammensetzung». Mitarbeiter von Herrn Dr. Lüschtg war auch an diesem Kapitel Herr R. Böhner, Zürich.

Die Redaktions- und Korrekturarbeiten erfolgten auf dem Büro der Kommission durch Fräulein V. Jenny, unterstützt durch die genannten Mitarbeiter und Herrn Dr. R. Lüschtg.

Die Herausgabe dieser Publikation war nur möglich dank der großzügigen Unterstützung seitens der «Stiftung der Schweizerischen Landesausstellung 1939 Zürich für Kunst und Forschung» und durch die Mitwirkung der Familie von Dr. O. Lüschtg.

Die Geotechnische Kommission freut sich sehr, daß dieses wichtige Kapitel der Hochgebirgshydrologie, mit deren Fragen sich Dr. Lüschtg während mehr als 30 Jahren aufs eingehendste beschäftigte, nun veröffentlicht werden kann. Sie möchte allen beteiligten Stellen für ihre Unterstützung und Mitwirkung herzlich danken.

Zürich, im März 1950

*Für die Schweizerische Geotechnische Kommission*

Der Präsident: Prof. Dr. F. de Quervain

## Vorwort

Die von der «Stiftung der Schweizerischen Landesausstellung 1939 Zürich für Kunst und Forschung» zur Verfügung gestellten Mittel und der selbstlose Einsatz der Geotechnischen Kommission und insbesondere ihres Präsidenten, Herrn Prof. Dr. F. de Quervain, für das Werk des verstorbenen Mitarbeiters ermöglichten die vorliegende Publikation des Kapitels 9 «Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen» des Werkes von Dr. O. Lütschg-Loetscher «Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges». Für die dem verstorbenen Autor damit bekundete Anerkennung und Ehrung spreche ich den Organen der erwähnten Stiftung, den Herren der Geotechnischen Kommission, den übrigen Mitarbeitern und insbesondere Herrn Prof. Dr. F. de Quervain und Fräulein V. Jenny den tiefempfundenen Dank der Familie aus.

Basel, im März 1950

Im Namen der Familie:

*Rolf Lütschg*

## Inhaltsverzeichnis

I. Ziel der Untersuchung . . . . .	1
II. Einleitung und Allgemeines . . . . .	1
III. Historisches . . . . .	12
A. Einleitung . . . . .	12
B. Untersuchungen von Gustav Bischof in den Jahren 1835/36 . . . . .	13
1. Allgemeines . . . . .	13
2. Bodentemperaturmessungen von Pfarrer Ziegler in Grindelwald . . . . .	15
3. Abflußverhältnisse der Weißen Lütschine . . . . .	16
4. Periodische Schwankungen des Grindelwaldgletschers . . . . .	17
5. Lage der Austrittsstellen der Gletscherabflüsse an den Gletscherstirnen . . . . .	17
6. Ablation im Winter – Retention . . . . .	18
7. Chemische Analysen der Lütschine in Grindelwald, der Aare in Bern und des Rheins in Basel . . . . .	19
C. Winterreise 1841 von E. Desor und L. Agassiz ins Berner Oberland . . . . .	21
D. Deutung des Ursprungs der Gletscherbäche durch Albert Heim, Zürich . . . . .	23
E. Deutung des Ursprungs der winterlichen Gletscherabflüsse durch H. Heß, Nürnberg . . . . .	28
IV. Über die subglazialen Wege der Gletscherbäche . . . . .	33
V. Die Temperatur der Gletscherbäche . . . . .	36
A. Allgemeines . . . . .	36
B. Zusammenhang zwischen Wasser- und Lufttemperatur im jährlichen Gang . . . . .	38
C. Ergebnisse . . . . .	39
a) Allgemeines . . . . .	39
b) Eigentümlichkeiten des Temperaturverhaltens . . . . .	40
D. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	42
E. Schluß . . . . .	43
VI. Chemismus . . . . .	45
A. Einleitung . . . . .	45
B. Untersuchungsmethoden . . . . .	50
1. Generelle Bestimmungen . . . . .	50
2. Bestimmung der anorganischen Einzelbestandteile . . . . .	52
C. Analysentabellen . . . . .	54
D. Die Analysenresultate . . . . .	54
1. Die Gletscher des Rheingebietes . . . . .	55
2. Die Gletscher des Rhonegebietes . . . . .	57
3. Die Gletscher des Adigegebietes . . . . .	60
4. Die Gletscher des Inngebietes . . . . .	60
5. Anhang . . . . .	61
E. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Zusammensetzung des Wassers bei Gletscherabflüssen . . . . .	62
F. Vergleich der Zusammensetzung des Wassers im Winter und im Sommer . . . . .	66
G. Die Tagesschwankungen der Zusammensetzung des Wassers bei Gletscherabflüssen . . . . .	70
H. Die Frage nach dem Verhältnis von Schmelzwasser zu Quellwasser in den winterlichen Gletscherabflüssen . . . . .	71
1. Allgemeines . . . . .	71
2. Analysen von Wasser an verschiedenen Stellen desselben Gewässers . . . . .	73
3. Zusammensetzung des Schmelzwassers aus moränenhaltigem Gletschereis . . . . .	80
4. Schlußfolgerungen über die Frage nach dem Verhältnis von Schmelz- und Quellwasser in den winterlichen Gletscherabflüssen . . . . .	81
I. Anhang – Summarische Analysen einiger weiterer Gebirgswässer . . . . .	88

VII. <i>Über einige Zusammenhänge zwischen dem Mineralgehalt von Winterwässern der Gletscher und der Gesteinszusammensetzung</i> . . . . .	91
A. Über die Herkunft des Wintergletscherwassers . . . . .	91
B. Beziehungen zwischen der Wassertemperatur und dem Trockenrückstand . . . . .	91
C. Die Gesteine als Stofflieferanten der Quell- und Gletscherwässer . . . . .	93
D. Die Gesteinsgrenzen und Gesteinszonen als Quellenhorizonte und ihr Einfluß auf den Stoffbestand der Quellwässer . . . . .	93
E. Die geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der untersuchten Gletscherabflüsse . . . . .	94
1. Die Gletscher in den kristallinen Gesteinen des Aaremassivs . . . . .	95
2. Die Gletscher in den Randgebieten des Aaremassivs . . . . .	101
3. Die Gletscher in den penninischen Schiefererien und Ophiolithen im Wallis und in Graubünden . . . . .	103
4. Die Gletscher in den kristallinen Deckenkernen des Wallis und Graubündens . . . . .	107
5. Die Gletscher in den jungen Graniten des Bergellermassivs . . . . .	110
F. Die Zusammenhänge zwischen der Gesteinszusammensetzung und dem Mineralgehalt der Gletscherwässer . . . . .	110
G. Arealchemismus und Fördermenge gelöster Stoffe pro Zeit- und Flächeneinheit . . . . .	116
H. Prozentualer Anteil der Gesteinsareale im Einzugsgebiet der Gletscherwässer und daraus berechneter Arealchemismus . . . . .	117
J. Tabelle der Projektionswerte für die Figuren 24 bis 26 . . . . .	119
K. Wintergletscherwasser und Quellwasser . . . . .	120
L. Literaturangaben . . . . .	121

## 9. Kapitel

# ZUR HYDROLOGIE, CHEMIE UND GEOLOGIE DER WINTERLICHEN GLETSCHERABFLÜSSE DER SCHWEIZER ALPEN

Abschnitte I—V von O. Lüschg-Loetscher

## I. Ziel der Untersuchung

Den Gletschertoren unserer Alpengletscher entfließt im Winter ein klarer kristallheller Bach. Es soll der Herkunft dieses winterlichen Gletscherwassers, seiner Temperatur und Chemie, sowie dem Zusammenhang zwischen dem Mineralgehalt des Gletscherbaches und der Gesteinszusammensetzung seines Einzugsgebietes nachgegangen werden. Im weitern soll der Frage der Mengenbeziehung von Quell- zu Schmelzwasser die nötige Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wir wissen heute, daß der winterliche Gletscherbach aus Quell- und Schmelzwasser (Schmelzwasser, herkommend vom sommer- und herbstlichen Retentionswasser und vielleicht auch von der Bodenwärme) besteht. Wieviel dem einen Teil, wieviel dem andern zukommt, ob wenig oder viel, darüber sind wir noch im unklaren.

## II. Einleitung und Allgemeines

### Einleitung.

Das von der Gesellschaft «Frei-Land» im April 1891 an den Bundesrat für sich und zuhanden der Bundesversammlung gerichtete Gesuch um Monopolisierung der Wasserkräfte der Schweiz gab indirekt den Antrieb zur Entwicklung der Hydrographie in der Schweiz nach verschiedenen Richtungen hin. Diese Gesellschaft erkannte schon vor mehr als einem halben Jahrhundert den vaterländischen Wert unserer Wasserkräfte; sie wollte die noch unbenutzten Wasserkräfte der Schweiz «zum ungeschmälerten Eigentum des gesamten Schweizervolkes» machen; sie wußte, daß noch eine große Zahl von Pferdekraften zu gewinnen war, daß die Fortschritte der Technik der Schweiz das Mittel in die Hand geben, sich unabhängig von der Kohle zu machen.

Am 4. April 1895 faßte die Bundesversammlung den Beschluß, dieser Eingabe keine Folge zu geben.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Es ist hier nicht der Ort, die Frage zu diskutieren, weshalb die Bundesversammlung dieser Eingabe keine Folge leistete.

Durch Bundesbeschluß vom 17. August 1895 wurde aber, als Folge dieses Gesuches, eine Untersuchung der *Wasserhältnisse der Schweiz* ins Leben gerufen und die *Hydrometrische Abteilung des Eidg. Oberbauinspektorates*, die damals unter der Leitung von Oberbauinspektor *A. von Morlot* und Dr. *J. Epper* stand, mit der unverzüglichen Durchführung derselben beauftragt.<sup>1)</sup>

Die Untersuchung erstreckte sich in systematischer Weise über alle Gewässergebiete der Schweiz, wobei jedes Gebiet nach folgenden vier Richtungen hin erforscht wurde:

1. Bestimmung der Flächeninhalte der Einzugsgebiete der einzelnen Flußläufe und ihrer Höhenlagen.
2. Klarstellung der Abflußverhältnisse im Bereiche der Pegelstationsanlagen des schweizerischen Gewässernetzes.
3. Aufnahme sämtlicher Längenprofile der fließenden Gewässer und
4. Ermittlung der Minimalwassermengen der fließenden Gewässer sowie ihrer Wasserführung an den Hauptpegelstationen des Schweizer Gewässernetzes.

Die vorliegende Studie «Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen» ist sozusagen ein Nebenprodukt des vierten Teils dieser Untersuchung und wurde vom Verfasser ins Leben gerufen, als es sich darum handelte, eine Anzahl Arbeitslose gelehrter Berufe zu beschäftigen. Sie ist das Ergebnis langjähriger Forschungsarbeiten im Schweizer Hochgebirge selbst und stützt sich auf ein aus eigenem Antrieb an Ort und Stelle erkämpftes Beobachtungs- und Meßmaterial.

Die Arbeit trägt vor allem hydrologisch-glazialen Charakter und ist aus Meinungsverschiedenheiten herausgewachsen, die im Verlaufe von Diskussionen über die Frage der Herkunft des winterlichen Gletscherwassers (Mengenbeziehung von Quell- zu Schmelzwasser) zwischen den Glaziologen *Albert Heim*, *Hans Heß* (Nürnberg) und mir, anlässlich gemeinsamer Begehungen des Rhonegletschergebietes zum Ausdruck gekommen sind.

Wie ich im Vorwort zum ganzen Werke hervorgehoben habe, soll die vorliegende Arbeit auch einen Beitrag zum Chemismus der Schweizer Gewässer liefern, einem Werke von allgemeiner Bedeutung, dem sich die *Geotechnische Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* (Präsident Professor Dr. *Paul Niggli*) bereits anfangs der dreißiger Jahre zu widmen beabsichtigte.

Die Arbeit wurde durch den eidg. Kredit für Arbeitslose ermöglicht und die chemischen Untersuchungen in den Jahren 1920 bis 1922 im chemischen Laboratorium des *Schweiz. Gesundheitsamtes* von Herrn Diplom-Chemiker *Paul Huber* mit vollem Erfolg ausgeführt. Die damalige Leitung dieses Amtes, Herr Direktor Dr. *Carrière*, und insbesondere Herr Professor Dr. *Schaffer* haben uns in zuvorkommender Weise ihre Räumlichkeiten und Einrichtungen zur Verfügung gestellt, wofür wir ihnen zu großem Danke verpflichtet sind.

### Allgemeines.

Die Bestimmung der minimalen Wasserführung der Gletscherbäche des Schweizer Hochgebirges gehört zu den schwierigsten Aufgaben, die dem Verfasser in seinen jüngeren Jahren von der Direktion der *Schweiz. Landeshydrographie* (Dr. *J. Epper* und Prof. Dr. *L. W. Collet*) anvertraut wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen im bündnerischen Rheingebiet, von den Quellen bis zur Taminamündung, wurden im Jahre 1907

<sup>1)</sup> Vgl. *O. Lütchig*: Die Entwicklung des hydrographischen Dienstes in der Schweiz. In: Die Wasserwirtschaft in der Schweiz. Herausgegeben vom Komitee der Gruppe 34: «Wasserwirtschaft» der Schweiz. Landesausstellung in Bern im Jahre 1914, S. 27-60.

vom Eidg. hydrometrischen Bureau herausgegeben,<sup>1)</sup> diejenigen im *Rhonegebiet*, von den Quellen bis zum Genfersee, bilden einen Bestandteil der Veröffentlichungen der *Abteilung für Landeshydrographie* im Jahre 1913.<sup>2)</sup> Weitere Ergebnisse finden sich in den Arbeiten des Verfassers: «*Der Märjelensee und seine Abflußverhältnisse*» (1915),<sup>3)</sup> dann in der Verbandsschrift Nr. 14 des *Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes: Über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge* (1926),<sup>4)</sup> in den Veröffentlichungen der *hochalpinen Forschungsstation Jungfrauoch: «Zur Meteorologie und Hydrologie des Jungfraugebietes»* (1931),<sup>5)</sup> und schließlich im Band II dieses Werkes: «*Zur Hydrologie der Landschaft Davos*», Kapitel 6, Abschnitt 2, III., V. und VI., S. 245 ff.

Über den Einfluß der Gletscher auf den Wasserhaushalt ihrer Abflüsse im allgemeinen und besonders im Winter habe ich mich wiederholt in den vorerwähnten Arbeiten und in Band II dieses Werkes ausgesprochen.<sup>6)</sup> Ich bin dabei zum Ergebnis gelangt, daß das Abflußvermögen eines Gletschers einerseits von seiner Größe und Gliederung, von seinem Gefälle und seiner Exposition und vom Relief des umliegenden Geländes (Orographie) des ganzen Gletschertales abhängt, andererseits mit dem Quellertrag des gesamten Gletschertales im Zusammenhange steht. Größe, Gliederung und Gefälle bestimmen im wesentlichen das Maß der Gletscherretention.

Zusammenfassend möchte ich über das Verhältnis des Gletschers zu seinem Abfluß folgendes bemerken:

Die Abflußmenge eines Gletscherbaches ist das Produkt einer ganzen Reihe von Vorgängen, die bis zur Meßstelle sich geltend zu machen vermögen. Im *Sommer* sind es vor allem das *Ablationswasser* (Hauptfaktoren: Strahlung und Temperatur), die *warmen Niederschläge* sowie das im Gletschertale an den Hängen und unter dem Gletscher zutage tretende Quellwasser, die die Größe des Abflusses bestimmen. Dem durch Erdwärme und Bewegung verursachten Schmelzwasser kommt im Sommer im Verhältnis der Gesamtabflußmenge zweifellos nur eine ganz untergeordnete Rolle zu. Sämtliche Faktoren, die diese Abflußmenge bedingen, gelangen aber des großen Retentionsvermögens der Gletscher wegen nur in mehr oder weniger eingeschränktem, d. h. ausgeglichenem Maße zur Auswirkung.

Über das Retentionsvermögen der Gletscher habe ich mich ebenfalls in eingehender Weise in der bereits zitierten Arbeit über den Märjelensee ausgesprochen (vgl. III. Teil, II. Kapitel, C. Die Abflußmengen der Gletscher im Winter, S. 329–340 und Tafel 15). Auf Tafel 15 dieser Arbeit habe ich die Abflußspenden (Liter pro Sekunde und Quadratmeter) in Zusammenhang mit der Vergletscherung der zugehörigen Einzugsgebiete gebracht. Aus der Lage der Punktschwärme geht klar hervor, daß, allgemein beurteilt, mit zunehmender Vergletscherung die Abflußspenden abnehmen.

<sup>1)</sup> Wasserverhältnisse der Schweiz. Rheingebiet von den Quellen bis zur Taminamündung. IV. Teil: Die Minimalwassermengen und die Minimalwasserkräfte der fließenden Gewässer sowie ihre Wasserführung an den Hauptpegelstationen. Bearbeitet und herausgegeben vom eidg. hydrometrischen Bureau, Bern 1907.

<sup>2)</sup> O. L ü t s c h g : Wasserverhältnisse der Schweiz. Rhonegebiet von den Quellen bis zum Genfersee. IV. Teil: Wassermessungen. Veröffentlichungen der Abteilung für Landeshydrographie, Bern 1913.

<sup>3)</sup> O. L ü t s c h g : Der Märjelensee und seine Abflußverhältnisse. Annalen der Schweiz. Landeshydrographie, Band I, Bern 1915.

<sup>4)</sup> O. L ü t s c h g : Über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge. Verbandsschrift Nr. 14 des Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes, S. 316 ff., Zürich 1926.

<sup>5)</sup> J. M a u r e r und O. L ü t s c h g : Zur Meteorologie und Hydrologie des Jungfraugebietes, S. 33 ff. Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. Internationale Stiftung, Bern (Schweiz) 1931.

<sup>6)</sup> Vgl. III. Teil – Forschungsgebiet Nr. 7 – Davosersee: Zur Hydrologie der Landschaft Davos, Abschnitt II, V. C. S. 275 ff.

Über das Zurückhaltevermögen der Gletscher wiederhole ich kurz folgendes: Es ist abhängig von den Größenverhältnissen des Gletschers und seines Einzugsgebietes, vom Verhältnis des Firns zur Zunge, vom Gefälle, von der Gestalt und Gliederung des Gletscherbettes und seiner Umgebung, von der Höhenlage und Exposition und von den geologischen Verhältnissen.<sup>1)</sup>

Von besonderer Bedeutung für die Lösung des vorliegenden Problems ist nun, und es geht dies aus den Diagrammen der Tafel 15 deutlich hervor, daß die Abflußspenden der Gewässer des oberen Rhonegebietes und des oberen Aaregebietes in ihren Größen verschieden sind und mit zunehmender Vergletscherung nicht im gleichen Maße abnehmen. Das obere Rhonegebiet weist ganz wesentlich *größere* Abflußspenden auf als das obere Aaregebiet.

Wenn wir den Ursachen dieser Ungleichheit nachgehen und dabei die meteorologischen Einflüsse ganz außer Spiel lassen, so kommt, wie wir später sehen werden, wohl vor allem den Quellverhältnissen hohe Bedeutung zu. Sie sind mit der Geologie und Hydrologie der einzelnen Landschaften aufs engste verbunden. Weiter in Betracht fallen: Größe, Situation, Höhenlage und Gestalt; in ihrem Wechselspiel bestimmen diese drei wichtigen Faktoren das Retentionsvermögen der Gletscher.

Die winterliche minimale Abflußmenge des Gletschers am Gletschertor ist das Produkt einer ganzen Reihe von Vorgängen, die bis zur Austrittsstelle zur Auswirkung gelangen. Einen zahlenmäßigen Betrag für jeden Einflußfaktor zu geben, ist nur innerhalb gewisser Grenzen möglich, im wesentlichen entspricht sie *einem Teil des Quellertrages des ganzen Gletschertales*.

Im *Winter* übernimmt der Gletscherbach im wesentlichen die nämlichen Funktionen wie im Sommer, nur mit dem Unterschied, daß die einzelnen Faktoren, die den Abfluß bedingen, in stark reduziertem, aber ungleichem Maße zur Auswirkung gelangen. Die Niederschläge bleiben größtenteils in fester Form zurück. Niederschläge in Form von Regen, die gelegentlich auch im Winter fallen, haben den Gletscherabfluß, soweit sie den Zeitraum unserer Untersuchungen berühren, nie zu beeinflussen vermocht. Das Rückhaltevermögen des Schnees im Einzugsgebiet sowie das des Gletschers selbst vereiteln einen solchen Vorgang. Der Regen wird durch den Schnee und den Gletscher festgehalten. Dem Ablationswasser kommt gegenüber seinem Ertrag im Sommer nur noch eine untergeordnete Rolle zu, auch der Ertrag der Quellzuflüsse wird etwas kleiner, zudem wird er auf dem Wege zum subglazialen Talbach durch die bekannten Einwirkungen von Schnee und Temperatur (Aufsaugevermögen des Schnees, Eisbildungen, Lawinen usw.) häufig noch weiter vermindert, das Retentionsvermögen und mit ihm die Ausgeglichenheit im Abfluß nehmen, vor allem der geringeren Spaltenbildung (Maß und Zahl) wegen, zu. Die Hauptfaktoren, die im Sommer den Abfluß bestimmen, Niederschlag und Ablation, werden also im Winter zu Nebenfaktoren und umgekehrt, mit andern Worten, Quellertrag, Retentionsertrag und Schmelzprodukt aus Erdwärme, Druck und Bewegung bedingen den winterlichen Abfluß des Gletscherbaches.

Es ist hier der Ort, um noch auf einen allgemeinen Unterschied hinzuweisen, der zwischen dem sommerlichen und dem winterlichen Gletscherabfluß markant ins Auge fällt. Er betrifft die *Farbe* des Wassers. Wie bekannt, besitzt der Gletscherbach im Sommer eine milchigweiße Farbe (Gletschermilch), die von der erodierenden Wirkung

<sup>1)</sup> Was für eine Bedeutung dem Rückhaltevermögen der Gletscher im Chemismus ihrer Abflüsse zukommt, geht recht deutlich daraus hervor, daß, soweit Untersuchungsmaterial vorliegt, die größte Verdünnung der chemischen Bestandteile des Wassers in den *September* und nicht in den Zeitpunkt der größten Wasserführung (Juli/August) fällt. Diese bemerkenswerte und auffallende Erscheinung dürfte wohl in erster Linie eine Folge des Retentionsvermögens der Gletscher im allgemeinen sein.

des Gletschers an seiner Sohle und Wandung herrührt. Im Winter ist das Wasser in fast allen Fällen kristallklar. Diese Ungleichheit weist nicht nur auf ein vermehrtes Retentionsvermögen im Winter hin, sondern sie wirft auch Licht auf die Frage des Verhältnisses von Quellwasser zu Schmelzwasser in der Winterszeit. Sprechen Reinheit und Farbe des Wassers beim Gletschertor in der ausgesprochenen Winterszeit nicht in erster Linie für einen Quellwasserursprung? Müßte Schmelzwasser von der Unterseite (Berührungsfläche mit dem Boden), der mitgerissenen Bodenteilchen wegen, nicht eine gewisse Trübung zeigen? <sup>1)</sup>)

Zur Erhärtung der vorliegenden Ergebnisse füge ich noch folgendes bei: Die Veränderlichkeit der Abflußspende der Gletscher von Flußgebiet zu Flußgebiet, die markant in Erscheinung tritt, bildet wohl einen der treffendsten Beweise dafür, daß der Gletscherbach im Winter vor allem ein Produkt des Quellertrages des ganzen Gletschertales ist. Diese Variabilität wird nun allerdings leicht eingeschränkt durch das ungleiche Retentionsvermögen der Gletscher, wodurch sein Abflußvermögen ungleich beeinflußt wird. Der Große Aletschgletscher liefert hierfür ein eindrucksvolles Bild.

Die minimalen Abflußspenden ein und desselben vergletscherten Flußgebietes nehmen in der Regel mit abnehmender Höhenlage der Meßstelle, d. h. mit zunehmender Größe des Sammelgebietes zu. Dies ist nur dann nicht mehr der Fall, wenn das Gebiet sehr stark vergletschert ist und zugleich auch das Retentionsvermögen des Gletschers kraftvoll zum Ausdruck gelangt. Dann bleibt ein größerer Teil des Quellertrages in den Randklüften und Spalten des Gletschers zurück, meist in Form von Randseen. Der Märjelensee ist hierfür ein treffender Beleg. Aus seinem 3,0 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet gelangt im Winter meist kein Tropfen Wasser zum Abfluß.

Zur Bekräftigung der vorliegenden Ausführungen gebe ich nachstehende Werte bekannt, die keiner weiteren Erläuterung bedürfen:

Rhone				Aare			
	Einzugs- gebiet km <sup>2</sup>	l/sec/km <sup>2</sup>	Gletscher Fläche		Einzugs- gebiet km <sup>2</sup>	l/sec/km <sup>2</sup>	Gletscher Fläche
Gletsch, 1760 m	38.87	3.4	0.62	Grimsel, 1810 m	91.35	1.8	0.57
Reckingen, 1330 m	214.61	7.9	0.23	Guttannen, 1050 m	164.29	2.4	0.42
Fiesch, 1002 m	317.90	8.9	0.18	Innertkirchen, 640 m	446.91	3.5	0.21
Brig, 680 m	831.20	8.6	0.32				

Was für eine Bedeutung den Quellen im Gletschertal im Hinblick auf die Entfernung der Meßstelle vom Gletschertor zukommt, geht recht klar aus den winterlichen Zu- und Abflußverhältnissen des Rhonegletschers hervor, die ich im Januar 1903 einer eingehenden Untersuchung unterworfen habe. Sie erstreckte sich über den ganzen unteren Teil des Zungengebietes und das Vorgelände des Gletschers bis zur Meßstation in Gletsch, rund 1,7 km unterhalb der Gletscherstirne. Die Moränenlandschaft zwischen Gletscherstirne und Meßstelle ist reich an Quellen.

Die Rhone in Gletsch, 170 m bachaufwärts der Pegelstation, führte am 29. Januar 1903 eine Wassermenge von 161 l/sec = 4,1 l/sec/km<sup>2</sup>. Die Messung der Quellzuflüsse zur Rhone von der Meßstation Gletsch bis zum Gletschertor (ohne den Abfluß des Rhonegletschers) ergab 76 l/sec = 1,9 l/sec/km<sup>2</sup>. Der Unterschied dieser beiden gemessenen

<sup>1)</sup> Ich bin vielen Randklüften, Gletscherspalten und Höhlensystemen in meiner langen Praxis nachgegangen; stets habe ich das Eis mit dem Boden verwachsen gefunden.

Werte von  $161 - 76 = 85 \text{ l/sec} = 2,2 \text{ l/sec/km}^2$  darf aber dem Abfluß des Rhonegletschers nicht gleichgestellt werden, denn die Erfassung sämtlicher Quelladern unter einer Schneedecke von 2 bis 4 m Mächtigkeit ist schlechterdings unmöglich. Den nicht erfaßten Teil der Zuflüsse (Quell- und Grundwasser) schätze ich auf rund 20 % des gemessenen. Dieser Zuschlag entspricht einem totalen Zufluß der Rhone von rund 90 l/sec, d. h. einem Gletscherabfluß von rund 70 l/sec, welcher Betrag einer Abflußpende von  $3,1 \text{ l/sec/km}^2$  gleichkommt.

Festhalten wollen wir weiter, daß an den Talhängen der Gletscherzunge Quellen auftreten, deren Wasser dem Gletscher direkt zufließt: Eine Messung der Quellgruppe beim Hotel Belvedere lieferte allein 1,4 l/sec. Nun tritt an den Hängen des Gletschertales noch eine beträchtliche Zahl von Quellen zutage. Subglaziale Gänge, wenn auch in geringerer Zahl als im Sommer, bestehen zweifellos auch im Winter. Die Möglichkeit, daß ein Teil des Quellertrages zum Abfluß gelangt, ist gegeben.

Schließlich soll noch auf das ungleiche Abflußvermögen der beiden benachbarten Eisströme, *Aletsch- und Fieschergletscher*, als eindrucksvolles Beispiel über ungleiches Retentionsvermögen und ungleichen Quellzufluß hingewiesen sein.

Die Ergebnisse sind folgende:

	Einzugsgebiet (E) km <sup>2</sup>	Fläche des Gletschers (G) km <sup>2</sup>	$\frac{G}{E}$	l/sec	l/sec/km <sup>2</sup>
<b>Fiescherbach, Fiesch<sup>*)</sup></b>					
17. II. 1903	79.98	41.75	0.52	517	6.5
18. II. 1903	79.98	41.75	0.52	363 <sup>1)</sup>	4.5 <sup>1)</sup>
24. II. 1903	79.98	41.75	0.52	675	8.4
23. II. 1907	83.38	41.75	0.50	465	5.6
<sup>1)</sup> Außergewöhnliches Minimum bei Flußbildung					
<b>Massa, Gebidem</b>					
9. III. 1903	200.24	146.05	0.73	278	1.4
7. II. 1913	201.99	146.05	0.72	258	1.3
<b>Massa, Bitsch</b>					
29. I. 1902	205.01	146.05	0.71	303	1.5
3. III. 1903	205.01	146.05	0.71	362	1.8
6. II. 1913	205.01	146.05	0.71	291	1.4

<sup>\*)</sup> Messungen der Abflüsse der beiden Zungen des Fieschergletschers vom 25. Februar 1903 ergaben total folgende Ergebnisse:  $Q = 0,326 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $q = 4,8 \text{ l/sec/km}^2$  ( $E = 67,41 \text{ km}^2$ ).

Zu den Ergebnissen des Fiescherbaches ist vor allem zu bemerken, daß zwischen Meßstelle und Gletscherstirne zahlreiche Quellen auftreten. Eine Begehung des Fieschergletschers im November 1908 erbrachte den Nachweis weiterer Quellvorkommnisse im Gletschertale selbst.

Dem Quellenreichtum des Fiescherbachgebietes steht eine ausgesprochene Quellenarmut des Massagebietes gegenüber.

Unterwerfen wir nun die *orographischen* Verhältnisse des Fiescher- und des Großen Aletschgletschers einem Vergleich, so finden wir Gründe genug, die neben der Ungleich-

heit im Quellaufreten die markanten Unterschiede in der Wasserführung der beiden Gletscherbäche erklären. Ich nenne nur die wesentlichsten Unterschiede:

Der Fieschergletscher besitzt im Gegensatz zum Großen Aletschgletscher ein bedeutend kleineres Retentionsvermögen: kleinere Fläche, kleineres Verhältnis des Firns zum Gletscher (Fieschergletscher 5,1 : 1, Aletschgletscher 3,4 : 1), größeres Gefälle, schmalere Zunge, größere und reichlichere Spaltenbildung und einfache Gliederung.

Das sind wohl die ausschlaggebenden Gründe, die die besonders auffallenden Unterschiede in der winterlichen Wasserführung dieser beiden benachbarten, in ihren morphometrischen Werten so ungleichen Gletscherlandschaften bedingen.<sup>1)</sup>

Der Quellerguß steht aber auch mit der *Geologie* und *Petrographie* des Gebietes, mit dem Bau des Bodens, seiner Morphologie und Struktur, mit seiner Bewachsung in engem Zusammenhang. Sein Anteil am Gletscherabfluß hängt mit der Entfernung des Quellaustrittes vom Gletschertor, d. h. der Wassermeßstelle zusammen. Damit in Verbindung stehen auch die Temperatur des Gletscherwassers und sein Chemismus.

Woher kommt wohl der große Unterschied, der zuweilen in der Wasserführung benachbarter Gletscherbäche in Erscheinung tritt und den Einfluß des Retentionsvermögens zu verschleiern scheint? Rührt diese Ungleichheit in der winterlichen Wasserführung der Gletscher nur vom unteren Einzugsgebiet des Gletschers her, oder ist der Abfluß das Ergebnis des ganzen Gletschertales? Das sind Fragen von hoher Bedeutung, die nicht leicht zu beantworten sind und von Fall zu Fall geprüft werden müssen. Auch im Firnggebiet treten Quellen zutage. Subglaziale Wege (Gänge) sind zweifellos, wenn auch in geringerer Zahl, vorhanden. Die Möglichkeit, daß auch ein Teil des im Firnggebiet austretenden Quellwassers zum Abfluß gelangt, steht außer Frage. Lokalen Verhältnissen, namentlich dem Spiel des Zufalls in der Spaltenbildung (Gletscherbewegung), dürften in dieser Frage oft eine wesentliche Rolle zufallen.

Das durch die Bodenwärme gebildete Schmelzwasser vermag nach meiner Ansicht nie über 0° zu steigen.<sup>2)</sup> Ein stärkerer Quellbach dagegen vermag, weil er sich meist unter einem gegen äußeren Einfluß schützenden Schneemantel fortbewegt, selbst nachdem er eine Strecke weit unter dem Gletscher geflossen ist, den Zugang zum subglazialen Talbache mit einer Temperatur von über 0°, dem Wärmeград der Quelle und der Lage der Vereinigungsstelle entsprechend, zu erreichen.

Liegt ein Gletscher relativ hoch und besitzt er zugleich geringes Gefälle, wie z. B. der Große Aletschgletscher, der Unteraargletscher, der Oberaargletscher und die größeren Gletscher des Berninagebietes, so dürfte der Abschmelzungsertrag durch Erdwärme praktisch sicherlich nicht in Betracht fallen, während umgekehrt zu erwarten ist, daß er bei manchen tiefliegenden, in engen Schluchten endenden Gletschern (Unterer Grindelwaldgletscher, Hüfigletscher usw.) vielleicht doch einen bescheidenen Faktor im winterlichen Wasserhaushalt des Gletschers ausmachen wird. Dabei stellt sich ganz von selbst die Frage, ob ein Abschmelzen an der Unterfläche des Gletschers möglicherweise nur in den tieferen Lagen stattfindet, d. h. also nur da, wo die mittlere Bodentemperatur über Null ist. Wenn ein Abschmelzen an der unteren Fläche des Gletschers auf Kosten der Erdwärme wirklich stattfinden und beständig fort dauern sollte, dann stellt sich die Frage, ob dieses Schmelzwasser den Gletscherbach auch wirklich erreicht.

<sup>1)</sup> Am Osthang der Grenzkette zwischen Massa und Rhone – sie verbindet das Fiescherhorn mit der Riederfurka – treten zum Teil ergiebige Quellen zutage. Die Frage, ob nicht ein Teil dieses Quellwassers aus dem Gebiet des Großen Aletschgletschers stammt und in gewissem Maße den Abfluß des Gletschers, die Massa, einzuschränken vermag, muß noch geprüft werden.

<sup>2)</sup> Gegen die Annahme eines Einflusses der Erdwärme spricht auch die Bildung von Grundeis an ruhigen Stellen unserer Gewässer.

Über diese Fragen hat sich auch Dr. *H. Carol*, Zürich, in seiner Arbeit «Beschreibung einer Gruppe von Gletscherrandklüften am Oberen Grindelwaldgletscher»<sup>1)</sup> geäußert:

«Wenn schon hier (*Carol* behandelt eine höhlenförmige Gletscherrandkluft) – etwa 50 m unter der Eisoberfläche unweit vom kalten Rande – Eis, Fels und Luft Temperaturen haben, die um den Nullpunkt schwanken, wieviel bestimmter darf da angenommen werden, daß die gesamte Gletscherunterfläche Winter und Sommer die dem Eisdruck entsprechende Temperatur besitzt, also nie am Boden angefroren. Denkbar wäre allerdings ein lokales Festgefrieren an Stellen, wo druckverflüssigtes Eis regelirt und hierbei allenfalls Frostsprennung erzeugt. Auch das Schicksal der im Abschnitt «Kerbenrandkluft»<sup>2)</sup> erwähnten Felsquelle dürfte aus Vorstehendem abzuleiten sein, indem ihr Wasser wohl nie tieferen Temperaturen unter dem Eise ausgesetzt sein wird, als sie der Temperaturerniedrigung durch den Eisdruck entsprechen. Da diese Beträge sehr gering sind (am Hintereisferner in 148 m Tiefe war die Eistemperatur  $-0,137^{\circ}$ ), wird das Wasser auch im Winter den Gletscherbach erreichen. Dies ein Beispiel für viele, wie wohl Dutzende unerforschlicher, subglazialer Quellen den winterlichen Gletscherbach speisen, welcher fließt, auch wenn die Schmelzung durch Erdwärme zu seiner Daseinserklärung gar nicht herbeigezogen wird.»

In theoretischer Beziehung stütze ich mich auf die Ausführungen von Prof. Dr. R. Süring im Lehrbuch der Meteorologie von Hann-Süring (S. 23), IV. Auflage, Leipzig 1926.

Süring gibt uns über den Einfluß der Erdwärme auf die Erdoberfläche folgende Auskunft:

«Es besteht ein konstanter Wärmestrom, der von den tieferen Erdschichten gegen die Oberfläche fließt und die Temperatur der Erdoberfläche etwas erhöhen muß. Die innere Erdwärme ist demnach auch eine Wärmequelle für die untersten Luftschichten, aber, wie die Rechnung zeigt, von sehr untergeordneter Bedeutung.

Man erhält die Wärmemenge, welche die Erdoberfläche infolge dieser Wärmeströmung aus dem Erdinnern an die Luft abgibt, wenn man den Temperaturgradienten  $2,8^{\circ}$  pro 100 m mit dem mittleren Wärmeleitungsvermögen der oberen Erdschichten multipliziert. Dieser (kalorimetrische) Wärmeleitungskoeffizient<sup>3)</sup> ist natürlich sehr verschieden für die verschiedenen Bestandteile der Erdoberfläche. Als mittleren Wert kann man beiläufig  $0,006$  annehmen<sup>4)</sup> (cm/sec), man erhält damit für die Sekunde und den Quadratzentimeter Erdoberfläche die Wärmemenge:

$$0,000286 \times 0,006 = 0,000001716 \text{ cal.}$$

Da das Jahr 31 557 000 Sekunden hat, so gibt die Multiplikation als Wärmezufuß aus dem Erdinnern pro Jahr 54 Kalorien (nach *Laby* 39).

Diese Wärmemenge wäre nur imstande, eine Eisschicht von 7,4 mm Dicke zu schmelzen. Die innere Erdwärme kann also nur wenig zum Abschmelzen von Eis- und Schneelagern beitragen. Man ist meist geneigt, diese Wirkung zu überschätzen.

Wir können weiter mit *Traberl* berechnen, daß die Mitteltemperatur der Erde durch

<sup>1)</sup> Mitteilungen der Geographisch-Ethnographischen Gesellschaft in Zürich, Band XLII (1943/45, S. 12–51).

<sup>2)</sup> Sehr instruktiv und wertvoll – er bestätigt auch meine Erfahrungen – ist *Carols* Hinweis, daß selbst bei stürmischem Wetter in solchen Randklüften jeder äußere Einfluß aufhört. Wie oft haben wir in solchen Höhlen Zuflucht gesucht und gefunden. Sicher ist, daß ihnen ein ausgesprochenes Lokalklima zukommt.

<sup>3)</sup> Das ist die Quantität der Wärme (in Kalorien), die in der Einheit der Zeit durch die Fläche 1 von der Dicke 1 hindurchgeht, wenn die Temperaturdifferenz  $1^{\circ}$  ist; vgl. S. 10.

<sup>4)</sup> Met. Z. 1897, S. 151/152.

den Wärmestrom von 54 Kalorien aus dem Erdinnern um  $0,1^{\circ}\text{C}$  erhöht wird, also nur um einen sehr geringen Betrag.

Diese geringe Bedeutung der inneren Erdwärme für die Erwärmung der Atmosphäre wird aber noch dadurch wesentlich eingeschränkt, daß zwei Drittel der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt sind. Da der Boden der Ozeane mit kaltem Wasser von nahe  $0^{\circ}$  bedeckt ist und dieses kalte Wasser in der Tiefe bleibt, so nimmt es so gut wie keinen Einfluß auf die Temperatur an der Oberfläche und damit auf die Lufttemperatur.»

Der *Wärmehaushalt der Gletscher* ist für ihre Bewegungsvorgänge bestimmend. Die ersten Temperaturmessungen wurden im Jahre 1832 durch *F. J. Hugi*<sup>1)</sup> in einer Spalte des Oberen Grindelwaldgletschers und in den Jahren 1841/42 und 1843/44 durch *L. Agassiz*<sup>2)</sup> in Bohrlöchern auf dem Unteraargletscher ausgeführt. In den Jahren 1887 und 1888 folgten die Untersuchungen von *F. A. Forel*<sup>3)</sup> und *Ed. Hagenbach-Bischoff*<sup>3)</sup> in den Wänden einer Grotte am Arollagletscher, in den Jahren 1895, 1899 und 1902 solche von *Ad. Blümcke* und *H. Heß*<sup>4)</sup> am Hintereisferner in Bohrlöchern von 40, 67, 84 und 153 m Tiefe.

Die Beobachtungen von *Ad. Blümcke* und *H. Heß* bestätigen die Beobachtungen von *F. A. Forel* und *Ed. Hagenbach-Bischoff*. Sie gipfeln darin, daß die Temperatur im Innern des Gletschers der den jeweiligen Druckverhältnissen entsprechenden Schmelztemperatur entspricht. Ich darf mich auf dieses Thema Raumes halber nicht näher einlassen. Vieles ist noch nicht abgeklärt, sicher ist nur, daß die *inneren* Wärmequellen dynamischen Ursprungs sind und mit der Bewegung des Gletschers zusammenhängen.

Die *Plastizität* des Eises bedingt das Strömen der Gletscher und besteht in inneren Umformungen. Über die Struktur der verschiedenen Eisarten und deren Änderungen ist schon eine Menge von Untersuchungen angestellt worden, auf die im einzelnen einzugehen mir nicht möglich ist. Nur auf die inneren Deformationen des Eises möchte ich kurz eintreten, indem ich die Frage aufwerfe, ob solche Vorgänge Schmelzwasser bedingen, die den winterlichen Gletscherabfluß zu speisen vermögen. Ich sage nein. Wir wissen, daß eine Lockerung des Gefüges und damit Plastizität durch die Umformungen und das Wachstum der Gletscherkörner bedingt ist. Sie erfolgt, wenigstens teilweise, durch Umschmelzungen. Diese führen zu Verdunstungs- und Kondensationsvorgängen, d. h. zu einer *trockenen* Metamorphose durch Sublimationsprozesse. Schmelzungs- und Wiedererstarrungsvorgänge, Umformungen auf nassem Wege, die bei Temperaturerhöhung beschleunigt, bei Temperaturerniedrigung verzögert werden, treten wohl ein, von einer thermischen Wirkung des Schmelzprozesses auf den Abfluß kann aber meiner vollen Überzeugung nach nicht die Rede sein.

Über den Energiehaushalt der Gletscher äußert sich mein Freund und Kollege Dr. *W. Jost*, der bekannte Physiker und Glaziologe, in kurzen Zügen wie folgt:<sup>5)</sup>

«Die Hauptenergieposten, die der Gletscher aufnimmt, sind die Strahlungsenergie, die durch Leitung von der Erde und ihrer Atmosphäre erhaltene Wärme, die Wärme,

1) *F. J. Hugi*: Über das Wesen der Gletscher und Winterreise in das Eismeer. Stuttgart und Tübingen 1842.

2) *L. Agassiz*: Système glaciaire. Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels. Paris 1847.

3) *E. Hagenbach-Bischoff* und *F. A. Forel*: La température de la glace dans l'intérieur du glacier. Extr. des Archives des sciences phys. et nat. XXI, 1889.

4) *A. Blümcke* und *H. Heß*: Tiefbohrungen auf dem Hintereisferner. Mitt. des Deutschen und Österreichischen Alpen-Vereins, 1901, 1902 und 1903.

5) *W. Jost*: Der Gletscher. Sechster Kommentar zum Schweiz. Schulwandbilderwerk. 6. Bildfolge 1941, Zürich 1941.

die dem Gletscher durch Niederschlag, Wind und Bäche zugeführt wird, und die Fallenergie. Die Hauptausgabeposten der Energie sind Schmelzwärme, Verdampfungswärme, Wärmeausstrahlung und die durch Leitung oder kältere Luft abgegebene Wärme. Der ganze Energieaustausch geht über den Wärmehaushalt des Gletschers; denn auch die Fallenergie wird zum allergrößten Teil durch die innere Reibung und die Sohlenreibung in Wärme umgesetzt; die Bewegungsenergie des Gletschers ist ja wegen der geringen Geschwindigkeit nicht bedeutend. Im Gleichgewichtszustand wird also der Gletscher eine solche Temperatur annehmen, daß Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe einander gleich sind. Dabei ist zu berücksichtigen, daß das Eis nicht über seine Schmelztemperatur hinaus erwärmt werden kann. Ist der Schmelzpunkt erreicht, so wird ein eventueller Wärmeüberschuß zum Schmelzen des Eises verwendet. Die Gletschertemperatur steht also im Mittelpunkt der Energiebetrachtung. Von welchen Größen ist sie abhängig?»

*Jost* macht darauf aufmerksam, daß Einstrahlung und Ausstrahlung, Wärmezufuhr durch warme Winde und warmen Niederschlag, auch Taubildung und Reifbildung usw. von großer Bedeutung sind für Ablation und Akkumulation des Gletschers, aber belanglos für die Temperatur der Masse eines größeren Gletschers; denn diese Wärmequellen erfassen nur die Temperatur der äußersten Oberfläche des Gletschers. Ähnlich verhält es sich mit den Temperaturschwankungen, die in einer Eistiefe von etwa 15 m kaum mehr merklich sind. Also bleibt nur noch der Einfluß der Jahresmitteltemperatur der Atmosphäre auf den Gletscher.

Den *Wärmebetrag der Fallarbeit* und die daherrührende Temperaturerhöhung des Gletschers berechnet *Jost* pro kg Eis und 1 m Fallhöhe zu 0,00234 kcal, d. h. 1 kg Eis von der spezifischen Wärme 0,5 wurde um  $0,0047^{\circ}\text{C}$  erwärmt. Fällt das kg Eis 100 m, so würde es durch diesen Fall selber um  $0,47^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden. Diese Temperaturerhöhung entspricht ungefähr der mittleren Zunahme, bzw. Abnahme der Temperatur der Luft pro 100 m. Die Fallarbeit reicht also gerade hin, um ein Eisstück, das z. B. die mittlere Jahrestemperatur besitzt, auf seiner Wanderung immer wieder auf die seiner jeweiligen Höhenlage entsprechende Jahresmitteltemperatur zu erwärmen. *Jost* nimmt nun den Fall an, die Eistemperatur hätte den Schmelzpunkt schon erreicht, was im Sommer in den Gletscherzungen der alpinen Gletscher der Fall ist, so wird die erzeugte Fallwärme eine gewisse Eismasse schmelzen. *M. Lagally*<sup>1)</sup> hat die Überschlagsrechnung für einen größeren Alpengletscher durchgeführt und als Ergebnis, in Übereinstimmung mit der Theorie von *C. Somigliana*, erhalten, daß die Fallwärme dieses 250 m tiefen Gletschers eine Eisschicht von 1,25 cm zu schmelzen vermöchte. «Das ist für den Eisbestand des Gletschers sehr wenig, aber bedeutsam für die Gletscherbewegung; denn es ist anzunehmen, daß das Eis nicht überall im Gletscher zum Schmelzen kommen wird, sondern vor allem da, wo *zuerst* der Druckschmelzpunkt erreicht wird, und das ist an der Gletschersohle der Fall. Die Gletschersohle wird also feucht und das Eis dort sehr plastisch sein. Dieser Zustand wird immer erreicht werden, sofern der Druck, d. h. die Eisdicke, hinreichend groß ist, um das Eis auf seine Schmelztemperatur zu bringen.

Über den Einfluß der Erdwärme spricht sich *Jost* folgendermaßen aus: «Bekanntlich nimmt im Mittel in der Erdrinde die Temperatur nach innen um  $1^{\circ}\text{C}$  pro 30 m zu. Infolge dieses geothermischen Temperaturgefälles fließt fortwährend ein Wärmestrom von innen nach der Erdoberfläche hin, der diesem Gefälle proportional ist und von der Wärmeleitfähigkeit des Materials abhängt. Ist diese bekannt, so läßt sich der Wärmestrom berechnen. *Lagally* hat gefunden, daß er allein im Gletscher ein Temperaturgefälle von  $1^{\circ}\text{C}$  pro 20 m zu erzeugen vermöchte. Besitzt aber das Eis an der Sohle Schmelz-

<sup>1)</sup> *M. Lagally*: Mechanik und Thermodynamik des stationären Gletschers. Gerlands Beiträge zur Geophysik, II. Suppl.-Band, Leipzig 1933.

temperatur oder erreicht es diese irgendwo im Gletscherkörper, so wird der Wärmestrom an dieser Stelle unterbrochen und die zufließende Wärme zum Schmelzen von Eis verwendet. Dieser Erdwärmestrom würde pro Jahr für sich allein an der Gletschersohle eine Schicht von 1 cm schmelzen: wieder belanglos für die Existenz des Gletschers, wichtig für seine Bewegung.»

Das ist deutlich genug und entspricht auch den Auffassungen meiner beiden verstorbenen lieben Kollegen von der Internationalen Gletscherkommission, *U. Monnerin* und *Somigliana*. Auch aus den Überlegungen von *W. Jost* darf zweifellos geschlossen werden, daß dem Einfluß der *Fall-* und *Erdwärme* auf den winterlichen Abfluß der Alpengletscher nur untergeordnete Bedeutung beizumessen ist. Praktisch beurteilt, glaube ich sogar, daß man die Größen dieser beiden Schmelzerträge bei der Aufstellung der winterlichen Wasserbilanz eines Gletschergebietes überhaupt nicht in Rechnung zu stellen braucht. Alles zusammenfassend habe ich schon in meinen früheren, bereits angeführten Arbeiten das Verhältnis des Gletschers und seines Einzugsgebietes zum winterlichen Abfluß am oder nahe des Gletschertores – und ich gelange auch heute zum nämlichen Ergebnis – folgendermaßen formuliert:

Der Gletscher verschärft den minimalen Abfluß der Hochgebirgsbäche. Im winterlichen Gletscherbach, beim Austritt aus dem Gletschertore, vereinigt sich nur ein Teil der Gewässer des Gletschertales:

Ein Teil der Zuflüsse, meist Quellwasser, die von den Talhängen und Seitengletschern herkommen, ein Teil des Ertrages der subglazialen Quellen (Grundquellen)<sup>1)</sup>, ein Teil des Ablationsertrages, von der Schnee- und Gletscheroberfläche herrührend, ein Teil des durch die Wärme der Quellen verursachten Schmelzwassers, ein Teil des Infiltrationswassers, herkommend von der sommerlichen Durchtränkung der von Haarspalten durchzogenen Gletschermassen und einem inneren Abfluß dieses Wassers unter dem Einfluß der Schwere (minimale Beiträge), und endlich ein Teil des Wassers, das durch innere Abschmelzung, durch den Mechanismus der Bewegung, des Druckes, der Reibung des Gletschers und die Erdwärme erzeugt wird (minimale Beiträge). Ein anderer Teil bleibt in den Randklüften (Randseen), in den Gletscherspalten, in den Trichtern, Wasserstuben und dgl. entweder vollständig zurück und gelangt erst im Frühsommer, in der Schmelzperiode, zum Abfluß, oder es findet ein allmähliches Aussickern, eine langsame Entleerung dieses vom Sommer her aufgespeicherten Schmelzwassers statt. Im weiteren habe ich auf den Anteil der Gletscher am Einzugsgebiet der Meßstelle, auf Höhe, Größe und Gestalt und auf die Bedeutung des Zungenendes hingewiesen. Auch der Einfluß des durch seine Heftigkeit und hohe Temperatur bekannten Föhns, der gelegentlich im Winter eintritt, dürfte sich in einem solchen Falle im Abfluß bemerkbar machen.

Über die *Mengenbeziehung* von Quellwasser und Schmelzwasser im Winter herrscht immer noch Unklarheit. Dies gilt namentlich für die viel besprochene und umstrittene Frage, was für einen Anteil dem Schmelzprodukt durch Erdwärme (Schmelzung auf der unteren Fläche des Gletschers) und durch den Druck, resp. die Bewegung (Reibung) des Gletschers am Gesamtbetrage des Gletscherbaches zukommt.

Es ergibt sich also ganz von selbst die weitere Aufgabe, genaue Erhebungen über Temperatur und Chemismus der Gletscherbäche im Winter anzustellen, um der Lösung dieser schwierigen Frage näherzukommen. Der Wortlaut dieser Aufgabe läßt sich ungefähr folgendermaßen formulieren: Entfließt dem Gletschertore während der Winter-

<sup>1)</sup> Zu der Ergiebigkeit der Quellen tragen zweifellos auch die Geröllhalden und Moränenformationen, Gebilde, die ja dem Hochgebirge eigen sind, viel bei. Die Fähigkeit solcher Gebilde, Wasser aufzunehmen, ist groß. Der Anteil der Quellwasser wäre ein noch wesentlich größerer, wenn das Retentionsvermögen der Gletscher sich nicht stark reduzierend bemerkbar machen würde.

zeit Quell- oder Schmelzwasser, oder setzt sich der klare Gletscherbach aus Quell- und Schmelzwasser zusammen? Wenn letzteres der Fall ist, in welchem Verhältnis stehen mengenmäßig Quell- und Schmelzwasser zueinander? Das sind Fragen, die für das Verständnis des winterlichen Wasserhaushaltes des Gletschers und für eine ganze Reihe anderer Probleme der Gletscherkunde, ich denke dabei vor allem an den Bewegungsmechanismus der Gletscher, von großer Bedeutung sind, weshalb Untersuchungen, die darüber Auskunft geben, sehr erwünscht sind.

Das vorliegende Thema ist in getrennter Weise von drei verschiedenen Standpunkten aus eingehend behandelt worden, nämlich vom *hydrologischen*, *chemischen* und *geologischen*. Die dabei zum Ausdruck gelangten Überlegungen und Schlußfolgerungen tragen rein individuellen Charakter. In meiner Schlußbetrachtung werde ich versuchen, sie soweit möglich auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen.

Zur Klärung dieses Problems sind im Verlaufe der Winter 1920 und 1921 möglichst nahe der Gletschertore an und aus den Abflüssen von 29 nach Lage, Gestalt und Geologie verschiedenen Gletschergebieten Temperaturmessungen ausgeführt und Wasserproben für die Durchführung von Analysen entnommen worden. Diese Untersuchungen erfolgten durch die technischen Organe des *Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft* unter Leitung des Verfassers, vielfach unter Lebensgefahr. Für die aufopfernde Tätigkeit im Hochgebirge, die zuweilen hohe, ja höchste Anforderungen stellte, sei meinen Mitarbeitern, Ing. *Traugott Lütschg* † und Techniker *Theophil Anker*, herzlich gedankt. Der *chemische* Teil in seinem ganzen Umfang wurde mit nie versagender Ausdauer und vollem Erfolg von Diplom-Chemiker *Paul Huber* ausgeführt, wofür ich ihm meine volle Anerkennung ausspreche. Die vielen Diskussionen, der enge Kontakt, die wir seit Jahren pflegen, trugen zur Förderung der Frage wesentlich bei.

Prof. Dr. *Paul Niggli*, Dr. *F. de Quervain* und Dr. *H. Huber* haben in verdankenswerter Weise den Abschnitt über die Beziehungen zwischen Petrographie und Chemismus der Gletscherwässer übernommen. Auch ihnen sei hiermit herzlich gedankt.

### III. Historisches

#### A. Einleitung.

Blicken wir in die Vergangenheit, so treffen wir nur wenige Arbeiten, die sich auf dem Versuchsweg mit unserem Problem beschäftigt haben. Die Frage wurde wohl aufgeworfen und in Diskussion gebracht, direkte Untersuchungen wurden aber nur wenige ausgeführt. Es stand dies zweifellos mit dem Umstand in Verbindung, daß ein winterliches Vordringen zu den Gletschertoren mit den damaligen Hilfsmitteln sehr große Schwierigkeiten mit sich brachte. Es brauchte und braucht heute noch dazu viel Mut und namentlich zähe Ausdauer. Um so erfreulicher ist die Tatsache, daß das nach Zahl wohl bescheidene, nach Inhalt aber überaus wertvolle Beobachtungs- und Diskussionsmaterial uns in sehr instruktiver Weise in das Wesen der obwaltenden Vorgänge einführt und uns den damals herrschenden Widerstreit der Meinungen eindrucksvoll vor Augen führt. Und es haben sich Forscher von Weltruf dieser Frage angenommen. Ich nenne nur *Bischof*, *de Saussure*, *de Charpentier*, *Agassiz*, *Desor*, *Vogt*, *Heim* und *Heß*. Die Berichte, die uns *G. Bischof*, *E. Desor*, *H. Heß* und *Albert Heim* hinterlassen haben, sind wahre Funde.

In der Wiedergabe der Nachrichten beschränke ich mich auf solche, die sich auf Begehungen in der Gletscherwelt selbst stützen, dafür gebe ich sie, soweit notwendig, im Originaltext, weil ihre Deutung treffender und kürzer nicht abgefaßt werden könnte.

## B. Untersuchungen von Gustav Bischof in den Jahren 1835/36.

*Gustav Bischof* hat im 9. Kapitel seiner Wärmelehre<sup>1)</sup> folgende Frage aufgeworfen: «Kann mit Sicherheit ein Abschmelzen der Gletscher von unten durch die innere Erdwärme behauptet werden, und welche eigentümliche Temperaturverhältnisse finden überhaupt bei den Gletschern statt?

### 1. Allgemeines.

Das Thema ist nicht neu. Schon *de Luc* (Rech. sur l'atmosph., II., 327), *de Saussure* (Voyages dans les Alpes, § 533) und andere Forscher haben auf dieses Phänomen aufmerksam gemacht und es aus einer stets zuströmenden inneren Erdwärme zu erklären gesucht. *Escher* (Gilbert's Ann. LXIX, 113) geht sogar so weit, daß er sagt: «Die Gletscher würden bald die obersten Kanten ihrer Seitengebirge erreichen, wenn nicht die innere Wärme der Erde sie an ihrer unteren Fläche abschmelzte und so die Unterhöhlungen und Eissenkungen bewirkte, durch welche das Gleichgewicht in der Gletschermasse, zwischen der oberflächlichen Anhäufung oder Nahrung und dem unterirdischen Abfluß bleibend unterhalten wird. Dadurch allein wird der Abfluß der Quellen aller Ströme unter den Gletschern bewirkt, welcher auch im Winter ununterbrochen statthat. Nur da, wo diese hohen vergletscherten Längentäler der Alpen durch Quertäler geöffnet sind oder wo vergletscherte Hochgebirge ihren Fuß bis in tiefere Täler erstrecken, wird die hoch aufgetürmte Gletschermasse über die steilen Abhänge in die tieferen, unter der ewigen Schneegrenze liegenden Täler herabgedrängt und durch eigene Schwere vorwärts geschoben, und hier schmelzt sie an ihrer unteren Fläche ununterbrochen, an ihrer oberen Fläche aber nur während der wärmeren Jahreszeit ab.»

Dazu schreibt *Bischof*: «Das Abschmelzen der Gletscher an ihrer unteren Fläche kann möglicherweise nur da stattfinden, wo die mittlere Bodentemperatur über Null ist. Denn in jenen Höhen, wo dieselbe auf oder gar unter Null herabsinkt und wo die Bedeckung des Bodens durch den Gletscher den Zutritt der warmen Sommerluft verhindert, kann kein Schmelzen des Eises auf der unteren Fläche des Gletschers mehr stattfinden.»

*Bischof* geht dieser Frage in längeren Ausführungen nach. Theoretische Betrachtungen führten ihn zu folgenden Schlüssen: Durch die Bedeckung eines Alpentaales mit einem Gletscher wird zwar das ursprüngliche normale Verhältnis der Temperaturabnahme vom Innern nach der Oberfläche gestört, und es kann sich, solange die Schneebedeckung dauert, nicht wieder herstellen; es wird aber dadurch nicht gänzlich aufgehoben. Die wirkliche Temperatur des Bodens unter dem Gletscher ist demnach zu unterscheiden von der, die ihm, nach Verhältnis seiner geographischen Breite und seiner Höhe ü. M., zukommt. Die Differenz zwischen beiden, in Graden des Thermometers ausgedrückt, ist das Maß für die aus der Unterlage des Gletschers in denselben strömende Wärme.

Die Menge des Eises, die an der unteren Fläche der Gletscher in einer gewissen Zeit abschmilzt, würde ein genaues Maß für die aus dem Innern der Erde entweichenden Wärme sein. Es fehlen aber die Mittel, jene Menge mit Zuverlässigkeit zu bestimmen.

Obgleich sich a priori erwarten ließ, daß die Bodentemperatur unter den Gletschern, wenn dieselben auch noch so tief herabziehen, nie viel über Null sein würde, so suchte *Bischof* doch durch direkte Beobachtungen sich hierüber zu belehren.

<sup>1)</sup> *Gustav Bischof*: Die Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers. Leipzig 1837.

«Ganz nahe am unteren Ende des *unteren Gletschers* zu *Grindelwald* bohrte ich im August 1835 6 Zoll tief in den Boden und steckte ein Thermometer in das Loch. Es zeigte + 2°. Am *oberen Gletscher*, so nahe wie möglich am Eise, jedoch von demselben durch den Gletscherbach, die *Schwarze Lütschine*, getrennt, fand ich in 12 Zoll Tiefe die Bodentemperatur 3,5°. Daß beide Temperaturen 0° nicht erreichten, kann nicht befremden; denn obgleich sie so nahe wie möglich am Eise bestimmt wurden, so waren diese Punkte doch dem Einfluß der am unteren Gletscher 3,5°, am oberen 6° warmen Luft ausgesetzt. Wie gering aber die Entfernung ist, bis zu welcher die Kälte des Eises und der Gletscherwasser wirkt, zeigte jene zweite Beobachtung. Ich hatte nämlich das Loch so nahe am Ufer der *Lütschine* gebohrt, daß deren Wasser von 0,6° fast bis an das Thermometer spülte, das Bohrloch aber doch nicht damit kommunizierte, und gleichwohl zeigte sich in dieser geringen Entfernung noch eine Differenz von 2,9°. Ebenso fand ich unmittelbar an dem Ufer der *Schwarzen Lütschine*, bei der Brücke zwischen *Grindelwald* und dem unteren Gletscher, zwischen der Temperatur des Bodens und des Gletscherwassers 3,6° und nur acht Schritte davon entfernt sogar 6,4° Differenz. Es unterliegt daher keinem Zweifel, daß eine Beobachtung unmittelbar unter dem Eise gewiß nahe 0° gegeben haben würde. Ich sage nahe 0°, denn genau 0° wird die Bodentemperatur unter den Gletschern selten sein, weil die Temperatur der Gletscherbäche, auch unmittelbar an ihrem Ausfluß aus den Gletschern gemessen, stets etwas über 0° war. So gaben mir sechs Beobachtungen der Temperatur der aus dem unteren Gletscher zu *Grindelwald* ausfließenden Ströme stets 0,4°, ein vierter, ganz kleiner Ausfluß 0,3°. Am oberen Gletscher fand ich die Temperatur des Gletscherbaches sogar 0,6° und am *Lämmern-Gletscher* 0,2°. Da ich, als die Thermometerkugel in ein Loch des auftauenden Gletschereises gesenkt wurde, genau 0° beobachtete, so sieht man, daß meine Thermometer richtig graduirt waren.»

Die Untersuchungen von *Bischof* beziehen sich auf *sommerliche* Verhältnisse. Im August 1835 fand er ganz nahe am Zungenende des *Unteren Grindelwaldgletschers* die Temperatur des Gletscherbaches 0,4° R, am *Oberen Grindelwaldgletscher* sogar 0,6° R und am *Lämmerngletscher* 0,2° R. Es sind drei Ursachen denkbar, sagt *Bischof*, die diese Temperaturerhöhung herbeiführen können. Erstens kann die durch die Eisgewölbe, woraus die Gletscherbäche kommen, einziehende warme Luft erwärmend auf das Wasser wirken. Zweitens kann die Bodenwärme unter dem Gletscher schon etwas erwärmend wirken. Drittens können Quellen und Bäche, die von den Seitengebirgen der Gletscher herab unter das Eis fließen, erwärmend auf das Wasser wirken. Dieser Umstand scheint namentlich beim *Oberen Grindelwaldgletscher* stattzufinden und dürfte daher die 0,6° R hohe Temperatur der *Schwarzen Lütschine* erklären.<sup>1)</sup>

«Wenn aber, wie sich schon a priori erwarten ließ, jenes durch die Spalten der Gletscher herabstürzende Wasser 0° ist, wenn es bis zu seinem Ausfluß aus dem Gletscher, nach den bisherigen Beobachtungen, sich höchstens bis zu 1,7° erwärmt: so kann nirgends unter dem Gletscher die Bodentemperatur viel über 0° sein. Dies gilt zwar zunächst nur für die warme Jahreszeit; da aber unter dem Gletscher die Erde gegen die Ausstrahlung geschützt ist, da selbst eine bedeutende atmosphärische Kälte Eismassen von einigen hundert Fuß Dicke nicht zu durchdringen vermag, und da während des Winters kalte Luft durch die Spalten und durch die Eisgewölbe entweder gar nicht oder

<sup>1)</sup> Vom Wetterhorn kommt ein starker Bach, der *Weißbach*, und vom Mettenberg ein noch stärkerer, der *Milchbach*, herab, die beide in den Gletscher stürzen. Obgleich auch diese Bäche nichts anderes sind als Gletscherbäche von höheren Teilen des Gletschertales, so werden sie doch, während ihres oberirdischen Laufes, zur warmen Jahreszeit sich etwas erwärmen und diese Wärme dem übrigen unter dem Gletscher zusammenrieselnden Wasser mitteilen.

doch nur in sehr beschränktem Grade eindringen kann, weil beide durch Schnee und Eis verstopft sind: so wird die Temperatur des Bodens unter dem Gletscher selbst im Winter kaum unter Null sein. Die mittlere jährliche Temperatur des Bodens unter dem Gletscher ist also ohne allen Zweifel  $0^{\circ}$ .»

Wenn das Abschmelzen der Gletscher an ihrer unteren Fläche durch die Erdwärme erfolgt, so ist man versucht anzunehmen, daß es sich an keine bestimmte Jahreszeit knüpfe, sondern im Sommer wie im Winter stattfinden werde. *De Saussure* (Voy. I, 453), *Escher* (Gilb. Ann. LXIX. 123), *Ebel* (Anleitung, die Schweiz zu bereisen usw., Zürich 1810, 3. Aufl., III, 121) und andere berichten, daß die Gletscherbäche auch im Winter fließen; *Ebel* fügt hinzu, daß sie dann klein seien. Auf die Aussagen der Ortsbewohner möchte ich aus bekannten Gründen lieber nicht abstellen. Sicher ist aber, daß ich bei meinen langjährigen *winterlichen* Forschungsarbeiten in den Schweizer Alpen an allen Gletschertoren einen Bach vorgefunden habe. Allerdings brauchte es in der Regel viel Zeit und anstrengende Arbeit, bis die Austrittsstelle, gewöhnlich unter tiefem Schnee begraben, aufgefunden und freigelegt werden konnte.

## 2. Bodentemperatur-Messungen von Pfarrer Ziegler in Grindelwald.

Über die wertvollen Bodentemperatur-Messungen von Herrn Pfarrer *Ziegler* in Grindelwald im Winter 1835/36, verbunden mit gleichzeitigen Beobachtungen über das Abschmelzen des *Unteren Grindelwaldgletschers*, und die von *Pagenstecher* in Bern ausgeführten Analysen darf ich raumeshalber nur in stark gedrängter Weise berichten.

Am 23. September 1835 stellte *Ziegler* in der Nähe des Gletschers in 4 Fuß Tiefe eine Bodentemperatur von  $3,2^{\circ}$  fest, am 27. Oktober eine solche von  $1,7^{\circ}$ . Die Lufttemperatur im Innern der Eisgrotte, hart am Eise, betrug  $2,6^{\circ}$ . Der Gletscher schmolz sehr unmerklich ab. Das unter dem Gewölbe hervorfließende Wasser war durchaus klar.

Am 2. Dezember 1835 betrug die Bodentemperatur bei Föhnwetter  $0,6^{\circ}$ , die Lufttemperatur hart am Gletscher war  $+6,0^{\circ}$ . Der Gletscher schmolz ab.

Am 28. Dezember 1835 erreichte die Bodentemperatur  $0,3^{\circ}$ . Die Temperatur der *Schwarzen Lüttschine* bei der Mettenbergbrücke, unter dem Eis, war  $0,1^{\circ}$ . Die strenge Kälte, die den ganzen Dezember hindurch anhielt, begann am 6. Dezember. Von da an war kein Abschmelzen des Gletschers mehr zu bemerken, ja das Wasser, das noch am 2. Dezember und vielleicht noch einige Tage später unter dem Eisgewölbe klar und grünlich hervorfloß und das wohl nach der allgemeinen Meinung der dortigen Einwohner von den Bächen und Quellen herrührt, die sich oben in den Gletscher ergießen, war bis auf den Grund gefroren. Dies zeigte sich nicht nur bei einer Öffnung unter dem Eise, die die Bewohner der nahegelegenen Hütte in die früher gebildete Eisdecke des Baches gemacht hatten, um Trinkwasser zu holen, sondern auch in der Eisgrotte selbst, wo Pfarrer *Ziegler* das Eis mit der Axt aufhauen ließ, um sich hiervon zu überzeugen.

Am 1. März 1836 erreichte die Bodentemperatur  $0,1^{\circ}$ . Um Mitte Februar trat einige Tage lang starkes Tauwetter ein, und einige Männer versicherten dem Pfarrer *Ziegler*, daß der Gletscher damals Wasser gegeben habe. Bald aber gefror es wieder bis auf den Grund, und am 1. März war keine Spur von Wasser mehr zu sehen.

Am 4. April 1836, bei einer Bodentemperatur von  $0,5^{\circ}$ , zeigte sich immer noch kein Wasser. Auch am 14. April war wenigstens die Schnee- und Eisdecke über dem Gletscherstrom noch nicht gebrochen, obschon während des ganzen Monats März hindurch häufiges Tauwetter war und in der ersten Hälfte April häufige Regengüsse, freilich mit reichlichem Schneefall abwechselnd, eintraten. Pfarrer *Ziegler* vermutete indes, daß die Gewässer in kurzem mit Macht hervorbrechen werden, vielleicht, wie schon öfter geschah, außerhalb des gewöhnlichen Kanals.

### 3. Abflußverhältnisse der Weißen Lütschine.

Und in dieser Vermutung liegt wohl auch des Rätsels Lösung. Der Verfasser hat selbst die Abflußverhältnisse der *Weißen Lütschine* unmittelbar bei ihrem Austritt aus der hohen Felsschlucht, also nahe des steilen Abfalls der Zunge des Unteren Grindelwaldgletschers in die Lütschinenschlucht, einer eingehenden Untersuchung unterworfen.<sup>1)</sup>

Sehen wir uns die winterlichen Abflußverhältnisse der Weißen Lütschine, also des Abflusses des Unteren Grindelwaldgletschers, etwas näher an. Die Hauptergebnisse seien hier in einigen wenigen charakteristischen Werten niedergelegt.

Der Grindelwald-Fiescher-Firn und das Obere Eismeer am Nordfuße der Grenzkette, die den Eiger und Mönch mit dem Finsteraarhorn und den Schreckhörnern verbindet, bilden das Nährgebiet des *Unteren Grindelwaldgletschers*. Aus seinem Zungenende bricht in wilder hoher Felsschlucht die *Weiße Lütschine* hervor. Ihr Einzugsgebiet umfaßt 44,54 km<sup>2</sup>, wovon 28,54 km<sup>2</sup> = 64 % vergletschert sind. Die mittlere Höhe des Gebietes beträgt 2800 m. Das Zungenende dürfte sich zur Zeit der Abflußstudien 1923 bis 1928 in rund 1150 m befunden haben.

#### Ergebnisse.

Winterliche monatliche Abflußmengen in m<sup>3</sup>/sec, monatliche Abflußmassen in Mill. m<sup>3</sup>, mittlere Abflußspenden in l/sec/km<sup>2</sup> und Abflußhöhen in mm, Periode 1923/24 bis 1927/28.

#### Lütschine Grindelwald

	X	XI	XII	I	II	III	IV	V
Abflußmengen m <sup>3</sup> /sec . .	1.78	0.81	0.24	0.12	0.14	0.16	0.90	3.22
Abflußmassen Mill. m <sup>3</sup> . .	4.78	2.10	0.64	0.32	0.34	0.43	2.33	8.61
In % des Jahresabflusses	3.8	1.7	0.5	0.3	0.3	0.3	1.9	6.9
Abflußspenden l/sec/km <sup>2</sup> .	40.1	18.2	5.3	2.7	3.1	3.6	20.2	72.2
Abflußhöhen mm . . . .	107	47	14	7	8	10	52	194
Temperatur Guttannen ° C	7.7 <sup>o</sup>	3.5 <sup>o</sup>	-1.6 <sup>o</sup>	-1.5 <sup>o</sup>	-0.4 <sup>o</sup>	1.5 <sup>o</sup>	5.7 <sup>o</sup>	9.5 <sup>o</sup>

#### Extremwerte

Jahr	Absolute Maxima			Absolute Minima		
	m <sup>3</sup> /sec	l/sec/km <sup>2</sup>	Datum	m <sup>3</sup> /sec	l/sec/km <sup>2</sup>	Datum
1923/24	34.5	775	22. Juli 1924	0.06	1.35	30. Jan. und 3. Feb. 1924
1924/25	33.4	750	22. Juli 1925	0.04	0.90	19. März 1925
1925/26	36.8	826	23. Aug. 1926	0.04	0.90	20. bis 30. Jan. 1926
1926/27	30.0	674	8. Aug. 1927	0.01	0.22	19. Feb., 28. März und 2. April 1927
1927/28	24.7	555	3. Aug. 1928	0.01	0.22	29. Jan. 1928

<sup>1)</sup> Vgl. J. Maurer und O. Lüttschg: Zur Meteorologie und Hydrologie des Jungfrau-gebietes. Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. Internationale Stiftung, Bern (Schweiz) 1931. III., S. 33 ff., Bern 1931.

#### 4. Periodische Schwankungen des Grindelwaldgletschers.

Auf einen wichtigen Punkt in der vorliegenden Frage soll schon hier aufmerksam gemacht werden. Es betrifft die periodischen Schwankungen der Grindelwaldgletscher.

Die Untersuchungen von Pfarrer *Ziegler* im Winter 1835/36 fallen in eine Periode relativ hohen Gletscherstandes; sie liegen innerhalb der beiden bekannten, markant ausgesprochenen Hochstandsperioden um 1820 (Grindelwaldgletscher: Höchststand 1819) und 1850 (Grindelwaldgletscher: Vorstoß 1840 bis 1855, hernach Rückzug). Dazwischen liegen kleinere Rückzugs- und Vorstoßvorgänge, zu denen auch die Jahre 1835 und 1836 (ab 1830 Zunahme) gehören, ja das Jahr 1836 dürfte bereits der Anfangsphase der großen Vorstoßperiode der fünfziger Jahre angehören. Damals erreichte der Gletscher immer noch in breiter Front die der heutigen Lütchinenschlucht vorgelagerte Kiesebene. Von ungefähr 1860 an begann der gewaltige Rückzug der Alpengletscher, der, wenn wir von den bescheidenen Vorstoßperioden um 1890 und 1920 absehen, bis heute anhält.<sup>1)</sup> Seit dem Hochstand von 1855 hat sich das Zungenende des Unteren Grindelwaldgletschers in die Schlupfwinkel der wilden und hohen Felsschlucht zurückgezogen. In steilem Abfall endigt heute der *Untere Grindelwaldgletscher* in dieser Klamm. Sein gesamter Abfluß erfolgt in einer Rinne und kann als ein Ganzes erfaßt und gemessen werden (vgl. die Ergebnisse, Tab.). Das war früher, speziell im Winter 1835/36, bei *breiter Front* nicht der Fall. Ob sich in diesem Winter der Abfluß des Gletschers wirklich nur in einer Rinne vollzog, d. h. ob an der Beobachtungsstelle von Pfarrer *Ziegler* das gesamte Winterwasser des Gletschers vorbeifloß, kann einwandfrei nicht festgestellt werden. Sicher dürfte es sich im vorliegenden Falle um eine Wasserader (Teilarm) gehandelt haben, deren Bett zeitweise, d. h. in Zeiten kleiner und kleinster Wasserführung, trockenlag. Wir wissen, daß die Gletscher, namentlich im Winter, ein großes Rückhaltevermögen für Wasser besitzen; ich brauche nur auf die Bildung von Randseen (Märjelensee usw.) hinzuweisen. Daß aber auf die Dauer von Wochen und mehr ein Gletscher von der Größe und Gestalt des Unteren Grindelwaldgletschers keinen Abfluß mehr führen soll, das ist, soweit meine Erfahrungen reichen, nicht möglich.

#### 5. Lage der Austrittsstellen der Gletscherabflüsse an den Gletscherstirnen.

Vom *Oberen Grindelwaldgletscher*, vom *Unteraargletscher*, vom *Fee-* und *Findelengletscher* usw. wissen wir genau, daß die Lage der Austrittsstelle großem Wechsel unterworfen ist. Ferner kommt es nicht selten vor, daß der Gletscherstirne an verschiedenen

<sup>1)</sup> Die Ergebnisse meiner Untersuchungen über die Schwankungen der beiden Grindelwaldgletscher sind kurzgefaßt folgende:

1540 Tiefstand	1903 leichter Vorstoß des Oberen Gletschers
1575–1600 sehr starker Vorstoß	1907–1910 leichter Vorstoß des Unt. Gletschers
<b>1602</b> Geschichtlich höchster Stand	1912 Vorstoß des Oberen und des Unteren Gletschers
1620 beinahe Höchststand von 1602	1912–1920 starker Vorstoß des Oberen Gletschers
1661–1686 starker Rückzug	1921–1924 langsames Vorrücken des Oberen Gletschers
1703 Vorstoß	1924–1945 Rückzug
1720 Rückzug	
1743 Vorstoß	
1748–1779 Vorstoß	
1819 sehr starker Vorstoß, erreicht aber den Höchststand von 1602 nicht	
1820 Rückzug	NB. Die Schwankungen des Unteren Grindelwaldgletschers folgen in der Regel etwas verspätet denen des Oberen Gletschers, tragen aber keinen so ungestümen Charakter wie die des Oberen.
1829/30 Vorstoß	
1840–1855 Vorstoß, hernach Rückzug	
1881 Vorstoß des Oberen Gletschers	
1898 Rückzug	

Stellen zugleich Wasser entfließt und daß sich oft der gesamte Gletscherabfluß, der Bodengestaltung entsprechend, in verschiedene Arme teilt. Es steht für mich ohne Zweifel fest, daß es sich bei der *Ziegler'schen* Beobachtungsstelle nur um einen trockengelegten Arm des Gletscherabflusses handelte. Was alles unter dem Schutze einer Schneedecke im Winter vor sich geht, entzieht sich eben unserem Auge. Für diese Deutung sprechen auch die Beobachtungen und Aufzeichnungen des Limnigraphen am Ausgang der Lütshinenschlucht eine deutliche Sprache. Sie legen namentlich Zeugnis ab, daß dem Gletscher in der fünfjährigen Untersuchungsperiode 1923/24 bis 1927/28 – kurzfristige Rückhalte nach losbrechenden und abstürzenden Eismassen ausgenommen – stets Wasser entquollen ist.

#### 6. Ablation im Winter – Retention.

Kehren wir zu den Ausführungen *Bischofs* zurück. Aus den Beobachtungen von Pfarrer *Ziegler* zieht *Bischof* vor allem den Schluß, daß am unteren Ende des Gletschers während des Winters *kein* Abschmelzen stattfindet.

«Dies war auch im voraus zu erwarten, da die Frostkälte des Winters die Unterlage des Gletschers an seinem unteren Ende, der sie ganz preisgegeben ist, notwendigerweise bis zum Gefrierpunkt oder noch unter denselben erkälten muß. Jene Beobachtungen zeigen auch, daß selbst in 4 Fuß Tiefe das Erdreich fast bis zum Gefrierpunkt erkältet war; in geringerer Tiefe war daher die Temperatur gewiß unter Null herabgesunken. Hieraus folgt aber noch keineswegs, daß sich auch die Bodentemperatur unter dem Gletscher, in den von seinem unteren Ende entfernteren Punkten, welche der unmittelbaren Wirkung der Frostkälte nicht ausgesetzt sind, bis zu jenem Grade erniedrigt habe. Immer muß man also noch der Möglichkeit Raum geben, daß dort noch ein Abschmelzen des Gletschers an seiner unteren Fläche auf Kosten der Erdwärme stattfinden könne. Wenn dem so ist, so kann freilich dieses Wasser nicht unter dem Gletscher zum Vorschein kommen, weil es, so wie es sich nur dem unteren Ende nähert, wieder gefrieren und einen Eisdamm bilden wird, der alles Ausfließen hindert.»

«Ist es ebenso gewiß, daß gewisse Gletscher im Winter Wasser geben, als daß andere keines geben; so möchte man wohl kaum diese Verschiedenheit in etwas anderem suchen können, als daß in diesem das Abschmelzen an der unteren Fläche nur auf Kosten der Erdwärme, in jenen aber zugleich durch Quellen bewirkt werde, wodurch der Gletscherbach auch während des Winters eine den Gefrierpunkt, wenn auch nur einige Zehntteile, übersteigende Temperatur erlangt, die das Ausfließen aus dem Gletscher möglich macht.»

«Wo bleibt aber das Wasser unter den Gletschern, die im Winter zu fließen aufhören, wenn das Abschmelzen an der unteren Fläche auf Kosten der Erdwärme wirklich fort-dauert?»

*Bischof* macht im weitem auf das große Retentionsvermögen der Gletscher im Winter aufmerksam und erwähnt die während des Winters zwischen dem *Valsorégletscher* und der steilen Wand des *Mont noir* sich ansammelnden Wassermassen.

Er gibt noch einen andern Weg an, der, wenn er mit Umsicht betreten wird, über das Abschmelzen der Gletscher an ihrer unteren Fläche Aufschlüsse geben kann. Davon ausgehend, daß die Gletscherbäche möglicherweise einen dreifachen Ursprung haben können, erstens von Quellen und Bächen, die in höheren Lagen in die Gletscher fließen, zweitens vom sommerlichen Schmelzwasser (Ablationswasser) und drittens vom Schmelzwasser, das an der unteren Fläche der Gletscher abschmilzt: so wird sich der Gehalt dieser Gletscherbäche an fixen Bestandteilen in verschiedenen Jahreszeiten auch verschieden zeigen.

Je mehr sich die dem Gletscher zufließenden Bäche und Quellen unter dem Gletscher mit geschmolzenem Gletschereis vermischen, desto mehr wird sich ihr ursprünglicher Gehalt an fixen Bestandteilen vermindern, und so ist zu erwarten, daß die Gletscherbäche im hohen Sommer den geringsten, im Winter den größten Gehalt an fixen Bestandteilen zeigen werden.

Man ersieht hieraus klar, wie durch eine zu verschiedenen Jahreszeiten unternommene Analyse der Gletscherbäche Resultate gewonnen werden könnten, die zu Schlüssen über die Menge des abschmelzenden Gletschereises führen würden. Er regt nicht nur Analysen des Abflusses, sondern auch solche der Zuflüsse an und argumentiert folgendermaßen: «Wenn z. B. gerade zu der Zeit, wo soeben die äußere Temperatur unter Null herabgesunken ist, eine solche Analyse angestellt würde: so könnte das Wasser möglicherweise nur noch mit demjenigen vermischt sein, welches von der unteren Fläche der Gletscher abschmilzt. Würden gleichzeitig mehrere benachbarte Quellen analysiert und fände sich der Gehalt an fixen Bestandteilen in der ärmsten unter ihnen immer noch größer als im Gletscherbach: so würde man mit vieler Wahrscheinlichkeit vermuten können, daß wirklich noch ein Abschmelzen des Gletschers an der unteren Fläche des Gletschers statthabe. Bei denjenigen Gletscherbächen, welche während des ganzen Winters Wasser geben, wie z. B. bei dem, der aus dem *Oberen Grindelwaldgletscher* kommt, könnte die Analyse bis zum strengsten Frostwetter fortgesetzt werden und, je nachdem fortwährend ein geringerer Gehalt an fixen Bestandteilen als in den benachbarten Quellen oder ein Steigen desselben bis zu dem dieser Quellen gefunden würde, könnte in ersterem Falle auf ein Abschmelzen, im zweiten auf ein Nichtabschmelzen des Gletschers an der unteren Fläche geschlossen werden.»

In diesen aus den Ergebnissen solcher Untersuchungen abgeleiteten Schlüssen äußerte sich *Bischof* selbst skeptisch: «Was bleibt aber in einem Falle, wo absolute Gewißheit kaum zu erreichen ist, anderes übrig als Wahrscheinlichkeit?»

Als sehr geeigneten Ort für solche Untersuchungen bezeichnete er *Grindelwald*, wo im Winter der Obere Gletscher stets Wasser, der Untere keines gibt, und wo eine zahllose Menge von Quellen am Fuße des *Meltenberges* und des *Eigers* entspringt.

#### 7. Chemische Analysen der Lüttschine in Grindelwald, der Aare in Bern und des Rheines in Basel.

Auf seine Bitte unterwarf Apotheker *Pagenstecher* in Bern im Herbst 1835 das Wasser der *Lüttschine*, welches aus dem *Unteren Grindelwaldgletscher* kommt, einer chemischen Untersuchung. Dieses Wasser wurde an einem hellen, schönen Tage, gegen Ende Oktober 1835, unter Leitung und Aufsicht von Pfarrer *Ziegler* am Eisgewölbe geschöpft. Der Gletscher schmolz zur Zeit des Schöpfens des Wassers durchaus nicht mehr ab, obschon Föhnwetter eingetreten war. Pfarrer *Ziegler* äußerte sich zur Wasserprobe mit den Worten: «Sehr wahrscheinlich ist das vollkommen klare und durchsichtige Wasser, das jetzt unter dem Gletscher hervorkommt, bloßes Quellwasser, wenigstens sehe ich nicht ein, wie mit Gewißheit behauptet werden könnte, daß es auch nur teilweise von geschmolzenem Eise herrühre.»

Das in Bern angelangte Wasser (Menge 658 Unzen = 20,13 l)<sup>1)</sup> war auch vollkommen klar und farblos, und in den Flaschen war keine Spur eines Bodensatzes wahrzunehmen. Da diese bedeutende Menge von 20,1 l abgeraucht und zur Analyse angewandt wurde, so konnte *Pagenstecher* selbst noch die in geringster Menge vorkommenden Bestandteile genau und sicher bestimmen.

<sup>1)</sup> 17 Berner Unzen = 520,1 g; 1 Berner Unze = 30,5941 g.

*Ergebnis der Analyse von Pagenstecher.*

In 10 000 Teilen Wasser fanden sich folgende Bestandteile:

Kohlensaurer Kalk . . . . .	0,40526
Kohlensaure Magnesia . . . . .	0,01900
Kieselerde . . . . .	0,03482
Tonerde . . . . .	0,00950
Schwefelsaures Natron . . . . .	0,07345
Schwefelsaurer Kalk mit Kristallwasser . . . . .	0,30711
Schwefelsaure Magnesia . . . . .	0,14881
Eisenoxyd . . . . .	Spur
Organische Materie . . . . .	Spur
	0,99795
Verlust	0,03102
	1,02897

Auf fluß- und phosphorsaure Salze sowie auf Strontian wurde vergebens geprüft.

Mit dieser Untersuchung wurden gleichzeitig die Analysen des Wassers der *Aare* und des *Rheins* verknüpft. Ersteres wurde in der *Nähe von Bern* bei hellem Wetter und klarer Strömung ungefähr in der Mitte des Strombettes geschöpft. Es war daher vollkommen klar und hatte in 24 Stunden nicht die mindeste Spur eines Bodensatzes gegeben. Das *Rhein*-Wasser wurde bei *Basel* in einiger Entfernung vom Flußufer und zu einer Zeit geschöpft, wo der *Rhein* völlig klar floß. Kein Bodensatz in den Flaschen, Wasser klar und farblos. Die Analysen, ebenfalls von *Pagenstecher*, Bern, ausgeführt, lieferten folgende Ergebnisse:

	Aare-Wasser	Rhein-Wasser
Kohlensaurer Kalk . . . . .	1,52191	1,27916
Kohlensaure Magnesia . . . . .	0,16824	0,13511
Kieselerde . . . . .	0,02693	0,02083
Schwefelsaures Natron . . . . .	0,00862	0,01845
Schwefelsaurer Kalk mit Kristallwasser . . . . .	0,17420	0,15357
Schwefelsaure Magnesia . . . . .	0,26005	0,03928
Chlornatrium } . . . . .	0,00287	0,01488
Chlorkalium }		
Tonerde und Eisenoxyd . . . . .	Spuren	Spuren
Organische Materie . . . . .	Spuren	0,03273
	2,16282	1,69401
Verlust	0,04992	0,01726
	2,21274	1,71127

*Interpretation Bischof/Hägenbach*

Der Vergleich der Bestandteile dieser drei Wasser zeigt eine nahe Übereinstimmung in qualitativer Hinsicht, nur daß im Wasser der *Lütschine* die Chlorverbindungen fehlen, während solche im Aare- und Rhein-Wasser, wenn auch nur in geringerer Menge, vorkommen. Nicht dieselbe Übereinstimmung findet in quantitativer Beziehung statt; hier ist im Gegenteil die Verschiedenheit groß. Namentlich das Wasser der *Lütschine* zeichnet sich durch einen relativ sehr geringen Gehalt an fixen Bestandteilen aus. Gleichwohl ist derselbe nicht so gering, daß man das Wasser der *Lütschine* bloß als Produkt des Abschmelzens des Gletschers, unter welchem es hervorkommt, betrachten könnte; *vielmehr charakterisiert es sich durch die Natur seiner Bestandteile ganz als Quellwasser ohne oder doch nur mit geringer Beimischung von Gletscherwasser.* (*Pagenstecher und Bischof.*)

Der Vergleich des Wassers der *Lütschine* mit dem der *Aare* kann zwar keinen sicheren Anhaltspunkt gewähren, da das letztere durch Vereinigung so vieler Gletscherwasser und Quellen gebildet wird. Auffallend aber ist doch, daß die fixen Bestandteile im *Aare*-Wasser mehr als das Doppelte wie im *Lütschine*-Wasser und der kohlen saure Kalk in jenem fast viermal soviel als in diesem betragen. Allerdings liegt das Wassergebiet der *Aare* größtenteils im Kalkgebirge; allein ebenso auch die Quellen im *Unteren Grindelwaldgletscher* sowie der Gletscher selbst. Auffallend bleibt es daher immer, daß die *Lütschine* so wenig kohlen sauren Kalk enthält, und so viel ist gewiß, daß entweder die in die *Aare* sich ergießenden Wasser, die nicht von Gletschern herrühren, sehr reich an kohlen saurem Kalk sein müssen, weil dieser Fluß, nachdem er die *Lütschine* und so viele andere Gletscherwasser aufgenommen hat, deren Kalkgehalt wohl nahe derselbe wie der der *Lütschine* sein mag, gleichwohl noch so reich an dieser Erde gefunden wurde, oder daß die *Aare* auf ihrem Wege durch das Kalkgebirge noch vielen Kalk auflösen muß. Das letztere ist übrigens das Wahrscheinlichere, da die *Aare* bis *Bern* größtenteils nur aus von Gletschern abfließendem Wasser sich bildet. Der geringe Gehalt des *Rheins* bei *Basel* an kohlen saurem Kalk, im Verhältnis zu dem der *Aare*, der auf einen noch geringeren Kalkgehalt des *Rheins* vor seiner Vereinigung mit der *Aare* schließen läßt, möchte wohl daraus zu erklären sein, daß das Stromgebiet des *Rheins* im Kanton *Graubünden* ganz im Gebiete der Uralpen, mit Ausnahme des nördlichen Teils, wo die Gebirge aus Tonschiefer und Kalk bestehen, liegt.

*Bischof* bedauert, daß keine der zahlreichen süßen Quellen, die am Fuße des *Mettenbergs* und des *Eigers* bei *Grindelwald* entspringen, bis jetzt analysiert worden sind, und versucht deshalb, aus dem bekannten Kalkgehalt anderer im Kalkgebirge entspringender süßer Quellen eine vorläufige Beantwortung der in Rede stehenden Frage zu erzielen, auf die aber hier nicht eingetreten werden soll.

### C. Winterreise 1841 von E. Desor und L. Agassiz ins Berner Oberland.

Aus: Carl Vogt: Agassiz' und seiner Freunde geologische Alpenreisen in der Schweiz, Savoyen und Piemont. – VII. Winterreise (1841). Unter Agassiz', Studers und Carl Vogts Mitwirkung verfaßt von E. Desor, Frankfurt a. M., 1847.

«Welchen speziellen Zweck man auch bei dem Studium der Gletscher verfolgen möge, auf eine Hauptfrage laufen dennoch alle Untersuchungen hinaus, auf die der Gletscherbewegung. Von jeher waren die Ansichten über den Mechanismus derselben geteilt.»

Mit diesen Worten beginnt *E. Desor* seine Darlegungen über die Winterreise, die er im Jahre 1841 mit seinem Freunde Agassiz ausgeführt, und auch ich könnte meine einleitenden Ausführungen über den Chemismus der winterlichen Gletscherabflüsse nicht mit besseren Worten beginnen.

«Die meisten Naturforscher folgten und folgen noch der Meinung *Saussures*, wonach der Gletscher durch die innere Erdwärme auf seiner Unterfläche schmelzen, so von dem Boden abgelöst werden und dann auf seiner geneigten Grundlage in die tieferen Täler hinabgleiten soll; *Venez* brachte noch in seiner denkwürdigen Abhandlung über die Veränderungen der Temperatur in den Alpen einige Tatsachen bei, welche dieses Gleiten der Gletscher zu beweisen schienen, *De Charpentier* und *Agassiz* bestritten ihrerseits diese Ansicht und behaupteten, der Gletscher bewege sich durch die Dilatation (Erweiterung) des in die Haarspalten des Gletschers einsickernden und gefrierenden Wassers. Nach *Agassiz* ist das Gleiten eine Unmöglichkeit, weil der Gletscher mit dem Grund und Boden zusammengefroren ist, und aus dem gleichen Grunde leugnet er auch die Abschmelzung der Unterfläche durch die Erdwärme. Die letztere Ansicht hat in der Tat

vieles für sich, und viele Forscher hatten sich für ihre Annahme erklärt; allein direkte Beweise dafür mangelten.»

*Desor* und seine Anhänger argumentierten so: Wenn die Erdwärme durch das von ihr bedingte Abschmelzen der Unterfläche die Ursache der Gletscherbewegung ist, so muß letztere von den Jahreszeiten und dem Temperaturwechsel unabhängig sein, und dem Gletscher müssen, im Winter wie im Sommer, Bäche entquellen.

*De Saussure* war schon auf diese Schlußfolge gekommen und war zur Lösung der Frage im Winter nach *Chamonix* gereist. Er sah bedeutende Bäche, wenn auch viel kleiner als im Sommer, unter dem Eise hervorbrechen. Die Frage schien damit entschieden, und man beruhigte sich bei dieser Lösung. Da indes die Gletscher meistens nur tiefe Bergtäler ausfüllen, so mußte man auch annehmen, daß ein Großteil der Quellen des Gletschertales dem Gletscher zufließt, so daß das Wasser des Gletscherbaches nicht gerade Schmelzwasser sein mußte. Dagegen müssen, wenn wirklich die Erdwärme es ist, die hier wirkt, alle Gletscherbäche im Winter wie im Sommer fließen, und kein einziger darf trocken sein. Das Austrocknen eines einzigen würde die Theorie der Abschmelzung durch die Erdwärme umstoßen. Zudem hat das Gletscherwasser mehrere Eigentümlichkeiten, die es vom Quellwasser unterscheiden. Es enthält stets erdige Teile, die es, beim steten Wechsel seines Bettes, von der zwischen dem Gletscher und seinem Felsboden angehäuften Material abspült. Das Winterwasser der Gletscher muß dieselbe Eigenart besitzen, dagegen, nachdem es sich einmal sein Bett gebrochen, hell und klar sein, im Fall es nur Quellwasser wäre. Auf diese Schlüsse gestützt, beschloß *Agassiz*, der die Bedeutung einer solchen Untersuchung einsah, die ihm bereits vertrauten Gletscher des *Berner Oberlandes*, den *Unteraar-* und *Rosenlaugletscher*, zu besuchen. Der Abmarsch von Bern erfolgte am 8. März 1841, also im Zeitpunkt der kleinsten Wasserführung der Gletscherbäche.

Über die Ergebnisse der Untersuchungen von *Agassiz* und *Desor* auf dem *Aargletscher* brauche ich hier nicht zu berichten. Sie hatten das Gletscherende selbst nicht entblößt gesehen und auch nicht darunter vordringen können, um sich durch direkten Augenschein zu überzeugen, daß wirklich keine Schmelzung stattfindet. Sie hofften, daß *Rosenlauri* günstigere Verhältnisse zu solchen Beobachtungen darbieten könne, was auch in reichem Maße der Fall war. Hierüber soll in der Folge berichtet werden.

Hören wir, was uns *Desor* über den äußersten Zungenteil des *Rosenlaugletschers* berichtet. Dieser Gletscher schien *Agassiz* und *Desor* zu diesem Versuche am geeignetsten, da der Kalkstein, auf dem er ruht, ziemlich weich ist, wenigstens weit weniger hart als die kristallinischen Felsmassen, über die die *Aaregletscher* sich hinbewegten.

«Der Absturz des Gletschers war ganz entblößt; die ganze Masse war seit letztem Herbst bedeutend vorgerückt, denn ihr Ende berührte den Rand des Schlundes, und ein ungeheurer Eisblock von mehr als 20 Fuß Höhe, Breite und Länge war von der oberen Schicht des Gletschers losgerissen und über den Schlund hinübergestürzt. Trotz diesem Einsturz war dennoch die obere Gletscherschicht weiter vor als die Basis, sie hing über das Bett des Baches herüber. Es scheint mir diese Tatsache ein Beweis, daß hier die oberen Gletscherschichten schneller vorgerückt waren als die unteren. Die prächtige, große, senkrechte Eisspalte, welche inmitten des Gletscherrandes sich findet und welche von allen Reisenden besucht wird, war unzugänglich; gerade an diesem Orte war das Vorrücken am bemerklichsten. Nur von der rechten Seite her konnten wir zum Gletscher gelangen, da diese weniger als die linke vorgerückt schien. Der Gletscherbach kommt aus der linken Seite, wir konnten nicht in das Tor eindringen, indes sahen wir doch, daß das Bett des Baches vollkommen trocken lag. Kein Tropfen Wasser kam aus dem Gletscher hervor; wir konnten dessen um so sicherer sein, als es notwendig in den Schlund hätte fallen müssen, was nicht unbemerkt geschehen konnte.»

«Die Hauptfrage war nun entschieden. Bestätigt fand sich durch die Erfahrung, was *Agassiz* a priori behauptet hatte, nämlich, daß die Erdwärme den Gletscher nicht abschmilzt; denn wenn dies der Fall wäre, so müßten alle Gletscher im Winter Wasser geben, und der *Rosenlauri* namentlich, der so tief herabsteigt, könnte keine Ausnahme von der Regel machen. Die Erdwärme hat demnach auf die Gletscher nicht den mindesten Einfluß. Derselbe Gletscher liefert uns sogar noch den Gegenbeweis dieser Tatsache, und zwar auf folgende Art: Bekanntlich trennt eine Art von Vorgebirge die untere Hälfte des *Rosenlaurigletschers* in zwei Arme, welche den Felsen von beiden Seiten umgeben. Man besucht meist nur den linken Arm, welcher dem Gasthof näher liegt. Diesen untersuchten auch wir. Der rechte Arm, eine Viertelstunde höher, ist weit breiter und mächtiger; das Tal, welches er ausfüllt, ist tief ausgehöhlt, während der linke Arm sich auf fast plattem Boden vorbewegt. Wenn demnach Quellen im Gletscherbett oberhalb seiner Teilung entspringen, so folgen diese, aller Wahrscheinlichkeit nach, eher dem rechten Arm, da dessen Bett weiter und tiefer ist. Da nun der Bach des rechten Armes vor der linken Gletscherhälfte vorbeifließt, so konnte uns nicht entgehen, zu sehen, ob er Wasser enthielt oder nicht. In der Tat hörten wir nahe bei uns das Murmeln eines Wasserrinnels im Bachbett; dem Geräusche nachgehend, bekamen wir ihn zu Gesicht. Das Wasser war hell und klar, wie das in der Nähe der Grimsel; es war auch nicht so fade und geschmacklos wie das gewöhnliche Gletscherwasser. Es konnte demnach nur Quellwasser sein, denn wenn es durch Schmelzung der unteren Gletscherschichten entstanden wäre, so würde es nicht nur dem Gletscherwasser geglichen haben, sondern wir hätten auch am linken Gletscherufer welches angetroffen. Wir stellten demnach als erwiesene Tatsache auf, daß die Gletscher im Winter nur Quellwasser geben. Ohne Zweifel war es auch nur Quellwasser, was *de Saussure* im Monat April dem Gletscher «*des Bois*» entströmen sah. Indes ist diese von *Agassiz* in seinen Untersuchungen über die Gletscher aufgestellte Behauptung nicht neu, sie wurde schon 1751 von *Allmann* ausgesprochen und später von Pfarrer *Ziegler* in *Grindelwald* bestätigt, nach dessen Beobachtungen der Bach des Oberen Grindelwaldgletschers auch im Winter strömt, während der des Unteren trocken bleibt. Seither hat außer *Hugi* niemand die Gletscher im Winter besucht, und dieser sagt gerade über die Hauptfrage kein Wort.»

#### D. Deutung des Ursprungs der Gletscherbäche durch Albert Heim, Zürich.

(Aus *Albert Heim*: Handbuch der Gletscherkunde, Stuttgart 1885.)

Aus den Betrachtungen *Heims* über die Abschmelzung der Gletscher durch die Erdwärme glaubt er wenigstens mit Wahrscheinlichkeit folgende Schlüsse ziehen zu dürfen:

a) daß in den Alpen von der Schneelinie an abwärts bei einigermaßen mächtigen Gletschern der Untergrund beständig, bei schwachen wenigstens während einer langen Zeit des Jahres wärmer ist als 0° oder, genauer ausgedrückt, Wärme an den unter 0° warmen Gletscher abgibt;

b) daß unter mächtigem Gletschermantel die innere Erdwärme eine Erhöhung der Untergrundtemperatur hervorbringt. Die Folge hiervon wird sein, daß bei mächtigen Gletschern eine untere Abschmelzung durch Erdwärme das ganze Jahr selbst bis über die Schneelinie hinauf reichen kann, während schwache und besonders durch viele Spalten der Durchkältung geöffnete Gletscher und Hängegletscher wenigstens in der kalten Jahreszeit am Boden bis unter die Firnlinie oft bis an das Gletscherende hinab fest anfrieren.»

*Heim* macht auf das Fehlen gewisser direkter Messungen aufmerksam: Ungenügende Kenntnis der Bodentemperaturen im Gebirge. – Keine Kenntnis der Tiefe, bis zu welcher hinab in verschiedenen Höhen die Winterkälte im Gletscher vorzudringen vermag. –

Keine Kenntnis der wirklichen Bodentemperatur unter den Gletschern. – Die einzige messend erkannte Tatsache sagt, daß die größeren Talgletscher auf weite Erstreckungen in die Gebiete reichen, die ohne Gletscher eine mittlere Bodentemperatur von  $+3^{\circ}$  bis  $+5^{\circ}$  C besitzen.

Auch *John Herrschell* (Phil. Mag. XXVII) gelangt zur Überzeugung, daß die Erdwärme schmelzend auf dicke Gletscher einwirke.

Die Gletscherbäche im Winter und die absolute Senkung der Oberfläche im Jahr werden durch mehrere Faktoren bestimmt, die Wirkung der Erdwärme ist aus denselben nicht zu isolieren. Die einzige Beobachtung, die *nur* als Folge der Abschmelzung auch im Winter erscheint, erblickt *Heim* im *Schwinden der Gletscher im Winter*, bei Fehlen aller Abschmelzungen von oben, bei Verschuß aller unter den Gletscher gehenden Luftwege durch Schnee. *Heim* hat bei Gelegenheit, *aber ohne darauf hinzuzielen*, folgende Beobachtungen am Hüfigletscher (Ende bei 1465 m) ausgeführt, wobei jeweilen beim ersten dauernden herbstlichen Schneefall und beim ersten Ausapern des Eises im Frühling der Stand des Gletscherendes gemessen wurde.

Zeitraum	Rückgang des Endes
3. November 1871 bis 28. Mai 1872	9,0 m
24. Oktober 1872 bis 25. Mai 1873	33,0 m

Bei der flach auslaufenden Scherbe, die das Gletscherende damals darstellte, ist die Abschmelzung an der Unterfläche des Gletschers etwa auf  $\frac{1}{10}$  bis höchstens  $\frac{1}{6}$  der Längenabnahme zu setzen. Weitere und vollständigere Beobachtungen dieser Art sind *Heim nicht* bekannt geworden.

*Bischof* fand am Ufer des Oberen Grindelwaldgletschers bei 1000 m ü. M.  $0,3$  m unter dem Boden bei  $6^{\circ}$  Lufttemperatur:  $+3,5^{\circ}$  C Bodentemperatur.

*Ziegler* beobachtete in  $1,3$  m unter der Bodenoberfläche im Jahre 1836 ebendort:

	Minimum	Maximum
Am Gletscherrande	$+0,1^{\circ}$ (März)	$+4,0^{\circ}$ (Juli)
Im Dorfe Grindelwald	$+2,2^{\circ}$	$+9,8^{\circ}$

*Heim* will hieraus deutlich den Einfluß des Gletschers in der Erniedrigung und konstanteren Gestaltung der umgebenden Bodentemperatur ersehen oder, was das gleiche ist, seine Absorption von Erdwärme zur Schmelzung. Vollständigere Beobachtungsreihen dieser Art, die zugleich über die Leistungsfähigkeit des Bodens Aufschluß geben, fehlen.

«So gewiß die Erdwärme abschmelzend auf die Gletscher wirkt, so wenig ist ihre Wirkung bisher messend bestimmt.»

#### *Die innere Schmelzung des Gletschers.*

Auf verschiedene Weise wird auch im Innern des Gletschers Eis geschmolzen.

An den Wänden der Wasserwege wird im Sommer von oben nach unten langsam fortschreitend das Eis ausgeschmolzen.

Ganz wie das Wasser wirkt die Luft, die ebenfalls an warmen Tagen in alle Spalten und Kamine oder Eisschächte und in die Haarspalten eingesogen wird, so daß sie eine innere partielle Schmelzung erzeugt.

Interne Schmelzung wird aber auch teilweise durch die Bewegung des Gletschers selbst und an der Unterfläche vielleicht sogar in geringem Maße durch die Reibung am Grunde bedingt.

Ferner bewirkt wahrscheinlich der Druck der eigenen Schwere der enormen Eismasse in gewissem Grade eine innere Verflüssigung. Quantitative Bestimmungen fehlen.

### Die Gletscherbäche.

Das Endprodukt der Wasseradern eines in sich geschlossenen Gletschergebietes ist der Gletscherbach, der aus dem Gletschertor am Ende des Gletschers hervorbricht. In ihm haben sich die sämtlichen Wassermengen des Gletschertales gesammelt; flüssige Niederschläge auf dem Gletscher, Tau auf Schnee und Eis, Abschmelzung des Gletschers von oben, von unten, im Innern, die Niederschläge auf die Talwände, der Ertrag der Grundquellen.

Der Gletscherbach ist, wenigstens im Sommer, bei ganz großen Gletschern manchmal auch im Winter, infolge der Reibung eingeschlossener Steine auf dem Untergrund, durch die Gletscherbewegung und Abschleifung derselben sowie des Felsuntergrundes trübe und unterscheidet sich dadurch sehr auffallend von den Schmelzwasserbächen der Gletscheroberfläche.

*Bischof, Ennemoser, die Gebr. Schlagintweit* haben Messungen der Temperatur der Gletscherbäche am Austritt aus den Gletschertoren ausgeführt.

Während das Wasser kleiner Bäche auf dem Gletscher fast genau stets  $0^{\circ}$  aufweist, steht der Gletscherbach unten bei seinem Austritt stets etwas höher, was Wirkung von Bodenwärme und Luftströmung ist. Es sind z. B. am Austritt aus den Gletschertoren gemessen worden:

Unterer Grindelwaldgletscherbach . . .	0,3–0,4 <sup>o</sup>	} Bischof
Oberer Grindelwaldgletscherbach . . .	0,6 <sup>o</sup>	
Lämmerengletscherbach . . . . .	0,2 <sup>o</sup>	} Ennemoser
Mittel von 10 Tiroler Gletschern . . . . .	1,0 <sup>o</sup>	
Pferderergletscherbach (Tirol) . . . . .	1,7 <sup>o</sup>	
Unteraarbach . . . . .	1,0 <sup>o</sup>	} Gebr. Schlagintweit
Gorner Visp . . . . .	1,5 <sup>o</sup>	
Marcellgletscher (Spieglerbach) . . . . .	0,2–0,3 <sup>o</sup>	
Hintereisgletscher (Oetz) . . . . .	0,5 <sup>o</sup>	
Pasterzengletscher (Möll) rechter Arm . . . . .	0,4 <sup>o</sup>	
linker Arm . . . . .	1,0 <sup>o</sup>	
Mittel . . . . .	0,7–0,8 <sup>o</sup>	

Es zeigt sich dabei, daß die Temperatur des Gletscherbaches fast unabhängig von der äußeren, in das Tor einströmenden Lufttemperatur bei jeder Witterung den ganzen Sommer über für jeden Gletscher ziemlich konstant ist.

Mit der Entfernung vom Gletscher, da der Bach auf wärmeren Boden und in wärmere Luft kommt, nimmt die Temperatur rasch zu, nicht regelmäßig und bei kleineren Bächen rascher als bei größeren.

Gewiß wirkt bei dieser Temperaturerhöhung auch der Tauniederschlag aus der Luft in den kälteren Bach sehr oft wesentlich mit.

### Beispiele:

*Trittbach*, stammend von einem sekundären Gletscher im Unteraargebiet, nach *Agassiz* (ohne Zeitangabe)

Entfernung vom Gletschertor	Temperatur
0 m	$0^{\circ}$
200 m	$1,5^{\circ}$
500 m	$3,0^{\circ}$
1000 m	$5,0^{\circ}$
1500 m	$6,0^{\circ}$
2000 m	$6,5-7^{\circ}$

<i>Aare</i>	Entfernung vom Gletschertor	Temperatur
	am Tor 0 m	1,0 <sup>o</sup>
	Grimsel ca. 4,0 km	2,0 <sup>o</sup>
	Handeck 9,5 km	3,5 <sup>o</sup>
	Guttannen 14,5 km	5,0 <sup>o</sup>
	Im Grund 18,0 km	6,0 <sup>o</sup>
	Meiringen 20,0 km	7,0 <sup>o</sup>
	Brienzersee 27,0 km	9,0 <sup>o</sup>

Ähnliche Beobachtungen haben *Agassiz* von der *Visp*, *Schlagintweit* von der *Oetz* gemacht.

#### *Gletscherbach im Winter*

*Tyndall* traf den *Arveyron* (Chamonixtal), Gletscherbach der *Mer de Glace*, im Winter trübe.

Nach Ing. *X. Imfeld* in Brig zeigt die *Massa*, der Ausfluß des Großen *Aletschgletschers*, im ganzen Winter eine milchige Trübung.

Die Bäche der großen *Berninagletscher* versiegen auch im kältesten Winter nach *Enderli* und *Dr. Ludwig* in *Pontresina* niemals, sind aber im Winter meist so klar wie Quellwasser. *Heim* fand den Ausfluß des *Hüfigletschers* im Februar 1872 unter einer Eisdecke ziemlich stark und etwas trübe. Die Bäche des Unteren *Grindelwaldgletschers*, des *Rosenloui-* und des *Oberaargletschers* hingegen stehen nach *Agassiz* im Winter fast ganz ab; nach andern Mitteilungen hingegen fließen sie verborgen unter dem Schnee fort, freilich sehr schwach und quellhell (*Pfarrer Straßer*, *Grindelwald*).

Aber ein und derselbe Gletscherbach kann sich in verschiedenen Jahren sehr verschieden verhalten, was vielleicht durch allerlei Zufälligkeiten im Verschluß oder Nichtverschluß von Luftwegen unter dem Eise durch den Schnee in Verbindung steht. Offenes Gletschertor gibt erkältende winterliche Luftströmung unter dem Eise, eingeschneite Tore halten die Unterfläche der Gletscher wärmer.

Ferner ist zu beachten, daß der Ausfluß oder Nichtausfluß am Ende des Gletschers im Winter noch nicht absolut über Abgabe oder Nichtabgabe von Wasser durch den Gletscher entscheidet, weil unter den Gletschern gewöhnlich für ein bedeutendes Wasserquantum Gelegenheit zur Versickerung und Filtration gegeben ist, insbesondere bei Gletschern auf Kalk oder Dolomithfels, wie *Rosenloui-* und *Grindelwaldgletscher* usw., und ebenso bei solchen mit großen vorgelagerten, stauenden Endmoränen und Bachablagerungen, wie *Unteraargletscher*, *Rhonegletscher* usw. Bei breitem Geschiebetalgrund, tief unter Eis und Schnee im Winter vergraben, ist es übrigens sehr schwierig, das abfließende Wasser zu finden; manche Angaben über Fehlen eines Gletscherbaches mögen deshalb auf Irrtum beruhen. Jedenfalls muß konstatiert werden, daß im Winter zahlreiche Flüsse der Alpen noch im Frühling klar sind. Die Reibung des Gletschers am Untergrund, oder richtiger die Ausspülung des Schleifschlammes, ist also viel geringer im Winter als im Sommer.

Das *Wasser der Gletscherbäche im Winter* ist von verschiedenen Ursachen, in Beziehung auf die Alpen, abgeleitet worden, und zwar von:

- a) Allmählicher Aussickerung des im Sommer in den Haarspalten schwammartig aufgespeicherten Wasserüberflusses (*Schlagintweit*);
- b) Quellen unter den Gletschern (*Agassiz* usw.);
- c) Innere Schmelzung durch den Mechanismus der Bewegung, Druck (*J. Thomson*), Reibung am Grunde usw. (*Weyprecht* teilweise);
- d) Erdwärme (*de Saussure* usw.).

Die allmähliche Abnahme der Gletscherbäche bis zu einem Minimum im Spätwinter oder Frühling beweist, daß nicht (d) die Erdwärme *allein* die Wintergletscherbäche bildet. Für allmähliche Aussickerung hingegen sprechen unsere früheren Reflexionen. Der Schlammgehalt sehr vieler Gletscherbäche im Winter beweist, daß es nicht nur (b) Quellen *allein* sein können; die Mitwirkung von Quellen (b) ist aber in einzelnen Fällen außer Zweifel (Baltistal) und in vielen wahrscheinlich.

Alle vier Wasserlieferanten tragen dazu bei, daß größere Gletscher stärkere Winterbäche geben als kleinere.

*Heim* weist auf Bestimmungen des Gehaltes an gelösten Substanzen in einzelnen Gletscherbächen zu verschiedenen Jahreszeiten hin. Je nach dem Anteil der Quellen am Winterbach wird im Winter der Gehalt an *Gelöstem* steigen. Wenn subglaziale Quellen stark beteiligt sind, so ist sogar denkbar, daß die Gletscherbäche an der Austrittsstelle im Winter einige Bruchteile eines Grades wärmer wären als im Sommer.

Es scheint mir, daß wir hier, wie so oft, einen Fehler der Einseitigkeit begehen würden, wenn wir nur *einen* Faktor als maßgebend bezeichnen wollten. Vor allem wäre es unrichtig, den wohl allgegenwärtigen Faktor, die Erdwärme, zu vernachlässigen.

#### *Taubildung auf dem Gletscher.*

(Aus *H e i m* : Gletscherkunde, S. 238 ff.)

Schon *Hugi*, *Schlagintweit*, *Agassiz*, *Dollfuß* und *Rendu* haben der Luftfeuchtigkeit teils auf die Vermehrung, teils auf die Ablation des Gletschers einen wesentlichen Einfluß zugeschrieben. Die einen aber ließen den Gletscher durch Verdunsten schwinden, die andern durch Feuchtigkeitskondensation aufschwellen und wachsen. Systematische Untersuchungen haben im Jahre 1870 *Forel* und *Dufour* auf dem Rhonegletscher angestellt (Bull. Soc. vaudoise des sc. nat., 1871). Danach ergibt sich die Feuchtigkeit der Luft als ein wesentliches Mittel zur Abschmelzung.

Luft von bestimmter Temperatur kann bekanntlich nur ein begrenztes Quantum Wasserdampf enthalten. Steigt der Feuchtigkeitsgehalt noch höher, oder sinkt die Temperatur unter die der Sättigung hinab, so müssen Nebel, Regen, Schnee oder Tau sich ausscheiden.

Ein feuchter Körper, wärmer als die Sättigungstemperatur der umgebenden Luft, wird verdunsten, und die umgebende Luft wird dadurch feuchter. Ein Körper aber, kälter als die Sättigungstemperatur der umgebenden Luft, wird an seiner Oberfläche Wasserdampf kondensieren, er wird sich mit Tau beschlagen. Im Gletscher haben wir einen Körper von 0°, eine Masse, die nicht über 0° zu bringen ist. Nur wenn der Sättigungspunkt der Luft unter 0° steht, wenn sie also weniger als 4,88 g Wasser in 1 m³ enthält (Sättigungsmenge: für 0° Temperatur Wassergehalt in 1 m³ Luft = 4,88 g), kann der Gletscher verdunsten, und zwar schwach, wenn er gefroren ist, lebhafter bloß dann, wenn die Temperatur der Luft über, ihr Sättigungspunkt unter 0° steht. In allen Fällen, da die Luft mehr als 4,88 g Wasser in 1 m³ Luft enthält, wird der Gletscher sich verhalten wie eine Flasche kaltes Wasser, in ein warmes Zimmer gebracht, er wird mit Tau beschlagen. Der Gletscher hat die Tendenz, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft stets auf 4,88 g in 1 m³ zu bringen.

Die Taumenge, die mit dem Schmelzwasser von der Eisoberfläche abfließt, ist vom Gletscher der Luft entzogen worden. *Schnee- und Eisflächen trocknen* im Sommer und auch an warmen Wintertagen *die Luft aus*. Niedrige beständige Temperatur einerseits, Trockenheit der Luft andererseits verzögern die Verwesung organischer Substanzen (Leichen von Tieren auf dem Gletscher, Wiesel, Gamsen, Insekten, trocknen zu Mumien ein, ohne zu

verwesen usw.). Jeder Wanderer in den Gletscherregionen verspürt die austrocknende Wirkung, und zwar um so mehr, je höher er geht, je schöner das Wetter, je größer die umgebenden Schnee- und Eisflächen. – Wind wirkt durch Wärme wie durch Feuchtigkeit im allgemeinen stärker auf die Ablation ein als ruhigere Luft, weil er immer neue Luftteile in Kontakt mit dem Gletscher bringt.

Schon *Dollfuß* hat gefunden, daß im Verlaufe des Sommers in den Alpen die meteorologischen Bedingungen derart sind, daß Kondensation auf den Gletschern etwa siebenmal häufiger vorkommt als Verdunstung. Nach *Forel* und *Dufour* sind im Sommer, solange es Tag ist, mit ganz seltenen Ausnahmen die Bedingungen für Taubildung auf dem Gletscher gegeben; selbst nachts kann dies noch fort dauern. Häufig tritt nachts Verdunstung und hier und da Nebelbildung aus dem Gletscher auf, doch nur in geringem Betrage.

Im Verlaufe des Sommerhalbjahres wird unvergleichlich viel mehr (jedenfalls mehr als zehnmal mehr) Tau dem Gletscher zugeführt, als Wasser von ihm in die Luft hinausgenommen. Die Gletscherbäche führen nicht bloß Regen- und Schmelzwasser, sondern auch noch Tauwasser ab, ähnlich wie infolge von Taubildung auch aus den Seen oft *mehr* Wasser ausfließt als zufließt.

Wenn Wasserdampf der Luft kondensiert wird, wird Wärme frei. In unserem Falle kann dieselbe nicht zur Erwärmung des taubildenden Körpers verwendet werden. Der Gletscher läßt sich nicht erwärmen, er läßt sich nur schmelzen. Alle durch Taubildung auf dem Eise freiwerdende Wärme wirkt *schmelzend*. Eine Gewichtseinheit Wasser von bestimmter Temperatur, die sich in eine Gewichtseinheit Dampf von gleicher Temperatur verwandelt, bindet 6,8mal soviel Wärme als eine Gewichtseinheit Eis von 0° in Wasser von 0° schmelzend. *Aus jedem Gramm Tau, das an der Gletscheroberfläche kondensiert wird, wird so viel Wärme frei, daß dadurch 6,8, sagen wir, aufgerundet 7 Gramm Eis geschmolzen werden.* Aus zahlreichen direkten Versuchen mit der Waage auf dem Eis des Rhonegletschers erhielten *Forel* und *Dufour* für die Tagesstunde der Monate August und September *im Mittel* bloß infolge der Taubildung eine Ablation der Gletscherfläche von 0,0018 m, das macht pro Tag etwa 0,018 m. Zeitweise kann dieser Betrag viel höher steigen als die Wirkung von Sonne und warmer Luft. Die Abschmelzung des Gletschers durch warme Luft ist selten eine reine Wirkung ihrer lebendigen Temperatur, sie ist vielmehr sehr wesentlich durch die Kondensation ihres Wasserdampfes auf der Gletscherfläche bedingt, denn «warme» Luft enthält mit seltenen Ausnahmen bedeutend mehr als 4,88 g Wasser in 1 m<sup>3</sup>. Es steht somit fest, daß die Feuchtigkeit der Luft durch ihre Kondensation ein sehr wesentliches Moment der Ablation ist. Dies gilt zunächst für die Alpengletscher. Es gilt im Prinzip für alle Gletscher, allein nach dem Klima wird sich das Quantitative der Erscheinung ändern.

#### **E. Deutung des Ursprungs der winterlichen Gletscherabflüsse durch Hans Heß, Nürnberg.**

In seiner Arbeit «*Winterwasser der Gletscherbäche*» tritt *Heß* auf unser Thema ausführlich ein. Es hatte dies seinen besonderen Hintergrund. Verschiedene mündliche Besprechungen, die wir gemeinsam vor Abfassung seiner Schrift, teils in Gletschergebieten selbst, teils im häuslichen Kreise, über diesen Gegenstand pflegten und die zu Meinungsverschiedenheiten führten, veranlaßten mich, dieser Frage noch vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken, d. h. zu ihrer Klärung auch den *Chemismus der Gletscherwässer* und den *Zusammenhang zwischen dem Mineralgehalt des Gletscherbaches und der Gesteinszusammensetzung seines Einzugsgebietes* in den Kreis meiner Betrachtungen zu

ziehen. Dies erfolgte um so mehr, als sich *Heß* von seiner Auffassung nicht zu trennen vermochte, nämlich, daß es sich bei den Gletscherbächen vor allem um *Schmelzwasser verschiedenen Ursprungs* handle, während ich ebenso fest an meiner Überlegung festhielt und für *vorwiegend Quellwasser* plädierte.

*Heß* benutzte meine Abflußergebnisse, also die nämliche Grundlage. Er stellte die minimalen Abflußmengen, in Gruppen nach dem Grade der Vergletscherung der Einzugsgebiete geordnet, tabellarisch und graphisch zusammen. Auch aus seinen Darstellungen ergab sich auf den ersten Blick, daß, allgemein beurteilt, mit zunehmender Vergletscherung die Abflußspende ( $l/sec/km^2$ ) kleiner wird. Es stellten sich aber dabei so große Abweichungen ein, daß ihren Ursachen nachgegangen werden mußte. *Heß* hat dies auch, nach seiner Art, gründlich getan. Hören wir, was er uns als gewiegter Physiker und Glaziologe darüber berichtet. Seine Auffassungen sind so wertvoll und klärender Natur, daß ich mich verpflichtet fühle, sie in der Folge möglichst vollständig wiederzugeben.

*Heß* beschäftigt sich zunächst mit dem Fehler, mit dem die Meßergebnisse behaftet sind, und gelangt zum Schluß, daß er gegenüber den Abweichungen fast nicht ins Gewicht fällt, was tatsächlich auch der Fall ist.

Wird die gemessene Wassermenge nicht gleichmäßig über das ganze Einzugsgebiet verteilt angenommen, so kann man in der Wahl der Verteilungsart so vorgehen, daß man für den  $km^2$  des eisfreien, nicht vergletscherten Gebietes  $x$   $l/sec$ , für den  $km^2$  der Gletscherfläche  $y$   $l/sec$  ansetzt. Man erhält dann für jede Messung, bzw. Minimumbestimmung, eine Gleichung von der Form  $ax + by = W$ , in welcher  $a$  und  $b$  die Flächen der entsprechenden Teile des Einzugsgebietes in  $km^2$ ,  $W$  die Gesamtwassermenge in  $l/sec$  bedeuten. Die nötigen Angaben für die Bestimmung der Größen  $a$  und  $b$  sind in unserer Veröffentlichung «Wasserverhältnisse der Schweiz, Rhonegebiet von den Quellen bis zum Genfersee, I. Teil: Die Flächeninhalte, Bern 1898» mitgeteilt. Für die Bestimmung von « $b$ » setzt *Heß* voraus, daß oberhalb der Randkluft wohl kaum eine Schmelzung auf der Firnsohle stattfindet, und verweist auf die Tatsache, daß die Gletschersohle größer ist als ihre Horizontalprojektion. Man hat die Horizontalprojektion des Gletschergebietes um das oberhalb der Randkluft gegebene Stück zu vermindern und den erhaltenen Wert durch den  $\cos$  des mittleren Neigungswinkels zu dividieren. Letztere Größe ist unsicher und kann in erster Annäherung durch den  $\cos$  des mittleren Neigungswinkels der Gletscheroberfläche ersetzt werden. Die auf diese Weise durchgeführte Flächenreduktion ergab Werte für  $b$ , die ziemlich genau mit den Horizontalprojektionen der ganzen Gletscherflächen übereinstimmen. Wegen der Unsicherheit der Neigungswinkel wurden letztere Werte für die weiteren Betrachtungen beibehalten. Es wurde nun versucht, die Größen  $x$  und  $y$  so zu bestimmen, daß die Übereinstimmung der Rechnungsergebnisse besser wird als die der Zahlen, die bei gleichmäßiger Verteilung der Wassermenge über die ganzen Einzugsgebiete erhalten wurden. Stellt man den Verlauf dieser Ergebnisse graphisch dar, so findet man leicht, daß nur die Annahme übrigbleibt, es seien die  $y$ -Werte für die verschiedenen Gletschergebiete gleich groß. In der Tat zeigen auch die verschiedenen Ausgleichsversuche, daß mit dieser Annahme die berechneten Werte um so besser mit der Beobachtung übereinstimmen, je kleiner  $y$  gewählt wird. Die Voraussetzung, daß aus den vergletscherten Gebieten gleiche Wassermengen pro  $km^2$  abfließen, hat von vornherein etwas für sich, wenn man die vom Gletscher stammende winterliche Wasserlieferung auf die aus dem Erdinnern kommende Wärme zurückführt und das Auftreten von Quellen gewöhnlicher Temperatur unter dem Gletscher als der Fläche proportional ansieht. (Warme Quellen schließt *Heß* aus, wie die Temperaturmessungen in den Bächen zeigen.)

Es kann sich nur um die Frage handeln, wie groß der Wert von  $y$  anzusetzen ist. Die Messungen ergeben als obere Grenze  $0,85 \text{ l/sec/km}^2$ . Als untere Grenze bleibt, da die Gletscherbäche auch im Winter fließen,  $y$  also nicht Null sein kann, nur der Wert für  $y$ , der aus den Daten für die geothermische Tiefenstufe (38 m im Simplontunnel) der mittleren Wärmeleitfähigkeit der Gesteine ( $0,006 \text{ gcal pro sec und cm}^2$ ) und der Schmelzwärme des Eises zu ermitteln ist. Er beträgt rund  $0,25 \text{ l/sec/km}^2$ .

Noch ein anderer Umstand ist zu beachten. Es ist klar, daß ein beträchtlicher Teil des nicht vergletscherten Einzugsgebietes während des Winters der Erdwärme gegenüber unter den gleichen Bedingungen steht wie die Gletschersohle. Dies ist dort der Fall, wo die Schneedecke hinreichend dick ist, um die Schwankungen der Lufttemperatur an der unteren Fläche der Schneedecke unwirksam zu machen. Dort kann man mangels besseren Zahlenmaterials die pro  $\text{km}^2$  geschmolzene Schneemenge gleich der auf der Gletschersohle verflüssigten Eismenge setzen, also unserer Annahme entsprechend  $0,25 \text{ l/sec/km}^2$ . Natürlich muß dann für die übrigen, tiefer gelegenen Teile des eisfreien Einzugsgebietes eine um so größere Wasserlieferung angesetzt werden, damit die bei den Messungen erhaltenen Werte erreicht werden. *Heß* bestimmte auch diese Wassermengen unter der Annahme verschiedener Höhenlagen für die untere Grenze des Gebietes, in dem nur Schmelzung an der Unterfläche der Schneedecke stattfindet. Er ermittelte die Werte  $x$  der Wasserlieferung pro  $\text{km}^2$  so, als ob sie ausschließlich dem unter der herabgedrückten Firngrenze gelegenen eisfreien Gelände zugehören. Sie sind viel größer als die bei gleichmäßiger Verteilung über das ganze Gebiet erhaltenen. Die Ursachen für die Verschiedenheiten in der Wasserführung der einzelnen Gletscherbäche sind also mit diesen Annahmen ganz in die eisfreien Teile der Einzugsgebiete verlegt und auch in diesen wieder den untersten, der Meßstelle nächstgelegenen Regionen zugewiesen. Daß dies berechtigt ist, scheint *Heß* einerseits aus dem Verlauf der Kurve, besonders aber durch die Tatsache begründet, daß mehrfach die an demselben Gewässer gelegenen Meßstationen um so höhere Werte der Wasserführung zeigen, je tiefer sie liegen.

Um zu sehen, wieweit sich aus den orographischen Daten die Verschiedenheiten des Wasserreichtums der einzelnen Gewässer erklären lassen, hat *Heß* die zeichnerische Darstellung der Verteilung des ganzen eisfreien Gebietes für jede Meßstelle benutzt, um die mittlere Höhe des unteren, unter der herabgerückten Firngrenze liegenden Teils zu erhalten. Die Höhendifferenz bis zum Niveau des Meßprofils gibt das mittlere Gefälle. Die Länge des Bachlaufes von der Meßstation bis zur mittleren Höhe diente als Seite eines Rechtecks, dessen Fläche der untere Teil des eisfreien Gebietes ist; die andere Seite desselben, in das mittlere Gefälle dividiert, gab dann die Tangente eines Winkels, den man annähernd als den mittleren Neigungswinkel der Talgehänge betrachten kann, von denen aus der Bach hauptsächlich seine Nahrung erhält. Die so gefundenen Neigungswinkel wurden tabellarisch so geordnet, daß für jede einzelne Gruppe annähernd gleiche klimatische Bedingungen gelten. Es wurden die rechts- und die linksseitigen Zuflüsse der Rhone je in eine Gruppe genommen, und ebenso wurde mit den Zuflüssen der Matter Visp verfahren. Man erkennt aus der Tabelle, daß im allgemeinen die Bäche die reichlichste Wasserführung haben, deren Talwandungen die steilere Böschung besitzen, während andererseits die eisfreien Gebiete mit geringerer Neigung auch die geringsten Wassermengen liefern. Hier kann das aus der Schneedecke produzierte Wasser langsamer abfließen, kann also leichter wieder verfestigt werden als in den steileren Gebieten. Dazu kommt, daß die Einzugsgebiete der Stationen Gletsch, Fiesch und Bitsch nach Süden offen sind, also unter einer günstigeren Einwirkung der Sonnenstrahlung stehen als die übrigen. Aber die auffallenden Unterschiede in der Wasserführung der Massa und des Fiescherbaches, die zwei unmittelbar benachbarten Gletschergebieten entströmen, lassen sich durch diese orographischen Verhältnisse nicht erklären. Hierzu müßte man wohl

die durch die riesige Ausdehnung des Aletschgletschers bedingte relative Trockenheit seines Gebietes gegenüber dem des wesentlich kleineren Fieschergletschers heranziehen; allein hier verläßt uns die Erfahrung, wir kommen in das Gefilde reiner Spekulation. *Heß* sucht nach weiteren Gründen, um den großen Unterschied in den Wassermengen der Massa und des Fiescherbaches zu klären. Er sucht nach klimatischen Unterschieden (Niederschlag, Temperatur), und es gelingt ihm auch, gewisse Beziehungen für einzelne Bäche festzustellen, aber auch mit Berücksichtigung dieser Verhältnisse wird der große Unterschied in den Wassermengen der Massa und des Fiescherbaches nicht verständlich. Auch die Unterschiede im Gestein, die Größe der Wald- und Wiesenflächen, die an dem verschiedenartigen Wasserreichtum der Bäche beteiligt sind, bringen nicht Licht in diese Ausnahmestellung.

Wir sehen, daß *Heß* keine Mühe und Arbeit gescheut hat, um der Lösung der vorliegenden Frage näherzukommen.

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen faßt *Heß* folgendermaßen zusammen:

Die Resultate der durchgeführten Messungen an Gletscherwässern sind sehr wohl mit der Annahme vereinbar, daß die Verschiedenheit in der winterlichen Wasserführung der Gletscherbäche nur von den Verschiedenheiten in den unteren, dem Bache zunächstgelegenen Teilen der Einzugsgebiete herrühren, und daß von den Gletschern selbst kein wesentlich größerer Betrag an Wasser geliefert wird, als der ist, welchen die aus dem Erdinnern stammende Wärme auf der Gletschersohle erzeugt.

Will man diese Annahme nicht machen, so sind Quellen, die unter dem Gletscher aus dem Felsen treten können, und die Verflüssigung von Eis, die durch die Gletscherbewegung stattfindet, als Ursachen der verschiedenen Wasserlieferung zu betrachten. Damit tritt man aber einerseits aus dem Bereich der bisherigen Erfahrung heraus, andererseits kommt man zu Resultaten, die mit den Ergebnissen der Messungen im Widerspruch stehen. *Heß* geht dann noch näher auf die Frage ein, ob durch die Gletscherbewegung ein Teil des Eisstromes verflüssigt wird. Die Möglichkeit eines derartigen Vorganges möchte er nicht von vornherein leugnen.

*Heß* kommt dann auf den Aufsatz von *R. v. Lendenberg* «Über die Abschmelzung der Gletscher im Winter» (Globus 1904, S. 377 ff.) zu sprechen. Ich trete auf diese mehr theoretischen Ausführungen, die namentlich die Frage der durch die innere Reibung produzierten Wärme betrifft, nicht näher ein, sondern begnüge mich damit, hier nur die Schlußfolgerung von *Heß* bekanntzugeben. Sie lautet: «Wäre die innere Schmelzung wirklich von besonderer Bedeutung, so könnte wohl kaum erwartet werden, daß die stärksten vergletscherten Gebiete die geringsten Winterwasser haben.

Mir scheint, man braucht die winterliche Wasserlieferung aus den Gletschergebieten nicht größer anzunehmen als den Betrag, den die Erdwärme zu liefern vermag, um mit den vorliegenden Messungsergebnissen in Einklang zu bleiben.»

*Schluß.* In Vorstehendem bin ich den Ausführungen meines verstorbenen Kollegen *Heß* gerne in etwas breiterer Form nachgegangen. Es geschah dies namentlich deshalb, weil wir uns jahrelang mündlich und schriftlich über alle Fragen, die mit diesem überaus komplexen Problem verbunden sind, in aller Freundschaft unterhalten haben und uns doch nicht vollständig zu einigen vermochten. Auf meine Anregung hin wurden auch sämtliche Ergebnisse meiner winterlichen Abflußmessungen in den Schweizer Alpen *Heß* vor ihrer Veröffentlichung übergeben. Seine Arbeit «Winterwasser der Gletscherbäche» trägt zur Klärung der vorliegenden Frage Hervorragendes bei.

Über den Gletscherbach berichtet uns, kurz gefaßt, *H. Heß* in seinem Werk «Die Gletscher»,<sup>1)</sup> Ausgabe 1906, folgendes:

<sup>1)</sup> H. Heß: Die Gletscher. Braunschweig 1904.

«Alles Wasser, das Ablation, Schmelzung durch Erdwärme, Quellen, Niederschläge in der Umrahmung der Gletscherzunge liefern, wird vereinigt den Gletscherbach bilden, der am Ende des Eisstromes zutage tritt.» – «Von den an der Verminderung der Gletschermasse tätigen Faktoren ist nur einer, die Erdwärme, nahezu konstant. Ihrer Wirkung werden wir das Vorhandensein von Wasser in den Rinnsalen der Gletscherbäche zuschreiben müssen, zu einer Zeit, wo die Ablation und die Niederschläge keine Flüssigkeit ins Tal senden. – Die Temperatur der Gletscherbäche ist beim Gletschertor etwas über  $0^{\circ}\text{C}$ ; haben ja schon die an der Oberfläche abfließenden Schmelzwasser häufig  $+1^{\circ}$  Wärme; wenn also auch das unter dem Eise fließende Wasser, welches das Hauptkontingent des Baches liefert, genau  $0^{\circ}$  hätte, so müßte doch dieser selbst bereits wärmer sein. Aber die Reibung, welche das Wasser auf dem Untergrunde erfährt, muß auch dazu beitragen, seine Temperatur zu erhöhen, solange es noch unter dem Eise ist.» – *Heß* macht im weitern auf die Zunahme der Temperatur mit zunehmender Entfernung vom Gletschertor, die von *Agassiz* sowohl am *Triftbach* als auch an der *Aare*, von *G. Greim* am *Jambach* (Silvrettagruppe) festgestellt wurde, aufmerksam. Diese Ergebnisse beziehen sich aber auf sommerliche Zeiträume, weshalb ich auf diese Erscheinung nicht näher eintrete.

An Hand meiner Untersuchungen und Messungen im Zungengebiet des *Rhonegletschers*, Ende Januar 1903, der Abfluß des Rhonegletschers am Gletschertor ergab am 29. Januar 84 l/sec, berechnete *Heß* «als zuverlässigste Schätzung» den Einfluß der jährlich durch die Erdwärme verursachten Abschmelzung an der Gletschersohle zu 2,27 Mill.  $\text{m}^3$  Wasser = 2,52 Mill.  $\text{m}^3$  Eis oder 8,6 % der jährlichen Abschmelzung an der Gletscheroberfläche (29,2 Mill.  $\text{m}^3$  Eis).

Der aus den Beobachtungen während des Winters 1903 abgeleitete kleinste Wert für den Abfluß des Rhonegletschers (28. Februar und 6. März 1903) erreichte 57 l/sec.

In seiner Schrift «Winterwasser der Gletscherbäche»<sup>1)</sup> sagt *Heß* u. a.: Die Verschiedenheit in der winterlichen Wasserführung der Gletscherbäche rührt nur von den Verschiedenheiten in den unteren, dem Bache zunächstgelegenen Teilen der Einzugsgebiete her, und von den Gletschern selbst wird kein wesentlich größerer Betrag an Wasser geliefert als der, den die aus dem Erdinnern stammende Wärme auf der Gletschersohle erzeugt. Will man diese Annahme nicht machen, so sind Quellen, die unter dem Gletscher aus dem Felsen treten können, und die Verflüssigung von Eis, die durch die Gletscherbewegung stattfindet, als Ursachen der verschiedenen Wasserlieferung zu betrachten.

In meinen Ausführungen über «Die Abflußmengen der Gletscher im Winter» in «Der Märjelensee» (Ausgabe 1915)<sup>2)</sup> habe ich mich in eingehender Weise mit den Ausführungen von *Heß* beschäftigt. Es geschah dies wiederholt auch in mündlicher Weise, zum Teil bei gemeinsamen Begehungen in Gletschergebieten selbst.

Meine Schlußfolgerungen (S. 340) lauteten damals folgendermaßen:

1. Der Gletscher verschärft die Minima der Wassermenge der Gebirgsbäche.
2. Die winterliche minimale Abflußmenge des Gletschers hängt nicht nur von seiner Größe, sondern noch von vielen andern Faktoren ab. Einen festen Betrag für den minimalen sekundlichen Abfluß pro  $\text{km}^2$  zu geben, ist nicht oder nur innerhalb gewisser Grenzen möglich.
3. Die minimale Abflußmenge des Gletscherbaches beim Gletschertor entspricht in der Hauptsache einem Teil des Quellertrages des Gletschertales.

<sup>1)</sup> H. Heß; Winterwasser der Gletscherbäche, Petermanns Geogr. Mitteilungen, 1906, Heft III.

<sup>2)</sup> O. Lütchig; Der Märjelensee und seine Abflußverhältnisse. Annalen der Schweiz. Landeshydrographie, Bd. L, S. 329–340, Bern 1915.

Der Heßschen Berechnung des Betrages der Abschmelzung an der Sohle des Rhonegletschers durch die Erdwärme sowie seinen Ausführungen über den Einfluß der Verflüssigung von Eis durch die Gletscherbewegung bin ich stets skeptisch gegenübergestanden, trotzdem Heß in *Albert Heim* einen Befürworter seiner Ansichten fand.

In seinem fast dreißig Jahre später erschienenen Werk (1933) «Das Eis der Erde»<sup>1)</sup> kommt Heß neuerdings auf diese Frage zu sprechen. Hören wir, was er uns darüber sagt:

«Die Schmelzung an der Sohle erfolgt durch konstante Wärmezufuhr, durch Leitung aus dem Erdinnern während des ganzen Jahres; dagegen schwankt die Ablation mit der Jahreszeit, der Witterung. – Innere Schmelzung ist eine Folge der Eisbewegung und der Energiewanderung im Gletscher, durch welche die inneren (und äußeren) Bewegungshindernisse überwunden werden. Sie erzeugt eine Vermehrung des flüssigen Anteiles in dem Wasser-Eis-Gemisch, als das man den unter starken Drucken strömenden Gletscher betrachten muß. Von dieser flüssigen Phase geht wohl nur ein ganz geringer Teil an den Gletscherbach und ins Sohlengestein über; der größere Anteil wird beim Nachlassen des Druckes (nahe dem Gletscherende) wieder fest. Auch das im Haarspaltennetz in den oberen 3 m des oberflächennahen Eises zirkulierende Wasser wird während kalter Nächte wieder fest, so daß also nur ein schwacher Anteil wie eine Art Grundwasserstrom fast unmittelbar unter der Gletscheroberfläche parallel zu dieser langsam abwärts fließt.»

Daß Heß der Schmelzung auf der Gletschersohle großes Gewicht beimißt, geht neuerdings daraus hervor, daß er aus den Ergebnissen meiner an den Abflüssen des Rhone-, Fiescher-, Großen Aletsch- und des Allalingletschers durchgeführten Winterwassermessungen den Ertrag dieser Abschmelzung annähernd zu schätzen versucht.

Zu meinen Schlußfolgerungen von 1915 bemerkt Heß, daß bei den Untersuchungen in Gletsch so gut wie alle Seitenbäche durch Messungen berücksichtigt worden seien und daß auch meine Angaben für den Allalingletscher aus zwei Messungen in der Saaser Visp kurz ober- und unterhalb des Zuflusses von diesem Gletscher gefunden wurden. Die für beide Fälle erhaltene Abflußspende von 2,8 l/sec/km<sup>2</sup> könne also als obere Grenze der Sohlenschmelzung angesehen werden. Da über subglaziale Quellen nichts Sicheres bekannt sei, werde man dem wirklichen Betrag (wenigstens auf dem eingeschlagenen Weg) nicht näherkommen.

## IV. Über die subglazialen Wege der Gletscherbäche

Über die subglazialen Wege der Gletscherbäche geben uns die Abflußvorgänge bei Gletscherseeausbrüchen (meist von Gletscherrandseen) manch wertvolle Auskunft. Die Ausbrüche des *Märjelensees am Großen Aletschgletscher*, die ich seinerzeit einer eingehenden Untersuchung unterworfen habe, sind hierfür wertvolle Belege. Die Ursachen der Ausbrüche des Märjelensees können folgende sein:

Der See steigt so weit an, daß er die tiefste Stelle des Steilabfalles der Zunge des Aletschgletschers gegen den See am Fuße des Eggishorns, die sog. Überlaufschwelle, erreicht und sich ein allmähliches Überlaufen des Seewassers einstellt. Das Wasser nimmt anfangs seinen Weg längs der Randkluft, oder es stürzt in eine Spalte und dringt hernach syphonartig von einer Spalte zur anderen vor, bildet an der Oberfläche oder subglazial

<sup>1)</sup> H. Heß: Das Eis der Erde. Sonderabdruck aus dem Handbuch der Geophysik, Band 7, Berlin 1933.

eigentliche Eiskanäle usw. und erreicht früher oder später auf Umwegen den subglazialen Hauptbach. Faßt das Profil nicht alles Wasser, so dringt der Überschuß neuerdings an die Oberfläche usw. Es spielt sich in der Regel ein sehr komplizierter Abflußvorgang ab.

Nur ganz selten findet der Bach einen Weg, der ihm einen direkten Zugang zum Gletschertor ermöglicht. Ich bin in viele Randspalten tief eingedrungen. Überall fand ich den Gletscher satt mit dem felsigen Untergrund verbunden. Ich bin fest überzeugt, daß sich die subglazialen Abflußvorgänge im Eise selbst und nicht etwa zwischen Eis und Boden abwickeln. Wir haben es mit ganzen Systemen von Abflußkanälen im Eise zu tun, deren Bauart und Formation (Anatomie) jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen sind und für jeden Gletscher seiner Lage, Gestalt und Größe entsprechend einen anderen Charakter tragen. Die Verhältnisse ändern sich in der Regel auch gegen das Zungenende zu. Das Gletschereis hat zweifellos gewisse Eigenschaften mit dem Karstgestein gemeinsam.

Von den mir in der Zeit von 1813 bis 1913, also innerhalb 100 Jahren, bekannt gewordenen 43 Ausbrüchen fallen 4 auf den Juni, 6 auf den Juli, 10 auf den August, 9 auf den September, 1 Ausbruch vollzog sich im Spätherbst, *ein einziger im Winter*, 12 sind unbestimmt. Wie zu erwarten war, stellen sich also die Ausbrüche in der Regel im Sommer ein, in der Wärmezeit, in der die Spalten weit und tief in den Gletscher hinabreichen. Und damit kommen wir ganz von selbst auf eine der wesentlichsten Ursachen solcher Ausbrüche, nämlich durch Spaltenbildungen im Bereiche der Gletscherzunge im Märjelenseebecken, veranlaßt durch die Bewegungsvorgänge des Gletschers und die Wärmewirkungen von außen und innen. In solche Spalten und Spaltensysteme dringt nicht nur warme Luft, sondern auch das Wasser des Sees, das im Sommer eine Temperatur bis 2,0° C besitzt. Infolge der auflösenden Tätigkeit dieses Wassers erweitern sich die Spalten unter Wasser. Eisbewegung, Spaltenbildung, Wärmewirkung (Ablation) sind überaus mannigfaltiger Natur. Ein längeres Beschauen der Absturzwand vom Seeufer aus gibt hierüber klare Auskunft: Das feenhaft Bild der imposanten Eiswand wechselt von Stunde zu Stunde.

Das Wasser dringt immer tiefer in die Spaltensysteme des Gletschers vor, bis ihm ein Abfluß in tiefere Regionen möglich wird. Je nach Lage und Querschnitt dieser subglazialen Wege findet eine mehr oder weniger große Absenkung oder ein Ausbruch des Sees in einem kürzeren oder längeren Zeitraume statt. Grundspalten führen in der Regel zu *vollständigen* Ausbrüchen.

Was sich in der Regel im Sommer im *großen* abspielt, vollzieht sich im Winter meist unter dem Schutze eines mächtigen Schneemantels bei mehr oder weniger geschlossenen Spaltensystemen im kleinen ab. Die Zahl der Randseen, die von Quellbächen der Talgehänge des Gletschers gespiesen werden, nimmt in der Regel zu. Einem meist nur sehr bescheidenen Teil der in diesen Seelein aufgespeicherten Wassermengen gelingt es auf weiten Umwegen, das Gletschertor zu erreichen. Das nämliche gilt auch für die subglazialen Quellen.

Die Aufzeichnungen über die Seeausbrüche geben uns einen klaren Einblick in solche Verhältnisse, und was besonders wichtig ist: sie legen Zeugnis ab, wie ungleich sich solche Naturvorgänge abwickeln, was für eine Bedeutung der Laune der Natur zufällt, weshalb die Temperatur der Gletscherbäche bei ihrem Austritt aus dem Gletschertor einen so unsteten Charakter zeigt. Lage der Quellen und Quellzuflüsse, ihre Entfernungen vom Gletschertor, der Einfluß der Spaltensysteme, der äußere Schutz durch die Schneedecke, Zahl und Größe der Rand- und Gletscherseen usw., alles in allem ist es eine Menge von Faktoren, die in ihren Kombinationen von Fall zu Fall verschieden auf die Temperatur der Gletscherbäche einzuwirken vermag und Ergebnisse zeitigen muß

wie die von uns festgelegten. Viele dieser Faktoren üben natürlich auch einen mehr oder weniger großen Einfluß auf den Chemismus der Gletscherbäche aus, auf den auch an dieser Stelle kurz hingewiesen sein soll.

Nun in Kürze das Wesentliche der Vorgänge, die sich auf und im Großen Aletschgletscher während der Ausbrüche des Märjelensees abgespielt haben. Die zugehörigen Quellangaben finden sich in meinem Werk über den Märjelensee.

#### **Ausbruch vom 1. bis 4. September 1887.**

Joseph Sideler fand am 4. September 1887 auf dem Wege von der Riederalp nach der Belalp den linken Teil des Aletschgletschers unter Wasser, den rechten dagegen frei vor.

#### **Ausbruch vom 25. Juli 1890.**

J. V. Widmann gibt uns über den selbst miterlebten Ausbruch des Sees – er wollte mit seinem Führer am Morgen des 25. Juli 1890 den Aletschgletscher überschreiten, um dem Eggishorn einen Besuch abzustatten – folgendes fesselndes Bild: «Noch hatten wir den Gasthof (Belalp) nicht aus dem Gesicht verloren, als plötzlich vom Gletscher her ein donnerähnliches Getöse erscholl, erst ein Krach und dann ein fortgesetztes Tosen. Erstaunt blickte ich hinüber. Dann rannte auch schon mein Führer an mir vorbei, zum Hotel zurück und rief: ‚Der Märjelensee! Der Märjelensee ist ausgebrochen‘... Mein Führer aber lud meinen Tornister ab und sagte, es könne natürlich keine Rede davon sein, unsere Partie auszuführen, Denn solange der Märjelensee ausfließt, was gewöhnlich 24 Stunden dauert, ist wenigstens der Weg von der Belalp nach der Riederfurka vollständig unterbrochen. Es bedurfte keiner Worte, mir dies begreiflich zu machen; ich sah es ja. Am jenseitigen Ende des Gletschers wälzte sich, zwischen dem Gletscher und dem Berg, ein starker Strom schmutzig-gelben Wassers mit furchtbarer Schnelligkeit in die Tiefe, da und dort Wasserfälle bildend, wie das abschüssige Terrain dergleichen mit sich brachte. Wer sich in dem Augenblick, da der Strom aus dem von ihm durchfressenen Ende der Gletscherwand hervorbrach, auf seinem Wege befunden hätte, wäre verloren gewesen; wie eine Schlange würde der Strom ihn erreicht und mit sich fortgerissen haben.»

#### **Ausbruch vom 8. bis 11. Juli 1892.**

«Der Märjelensee strömt seit einer Stunde und noch fortwährend über den Aletschgletscher herunter.» (Telegramm Präsident der Gemeinde Naters, Salzmann, an Baudepartement Kanton Wallis vom 9. Juli 1892, 3 h 52.)

#### **Ausbruch vom 15./16. August 1907.**

Langsame Entleerung des Sees längs der Randkluft am Fuße des Eggishorns. Das Wasser schafft sich syphonartig von Randkluft zu Randkluft, von Spalte zu Spalte einen Weg. Auf weithin sichtbarer Strecke wälzt sich der Bach zwischen Fels und Gletscherrand talabwärts.

#### **Ausbruch vom 22. Juni bis 16. Juli 1911.**

Sehr langsame Entleerung, ohne jegliche Spuren auf der Oberfläche des Gletschers zwischen See und Gletschertor hinterlassend.

#### **Ausbruch vom 30./31. Juli 1913.**

Erst langsame Absenkung bis 29. Juli, dann raschere bis 30. Juli, 14 h 00. Am 31. Juli, 8 h 00, war der See bis in den tiefsten Grund ausgelaufen. Vom See bis zum Gletschertor keine Spuren an der Oberfläche. Die Bildung einer Grundspalte ermöglichte den vollständigen Ausbruch des Sees auf subglazialen Wege.

Insgesamt darf festgestellt werden, daß das ausbrechende Wasser des Märjelensees meist den Randklüften der linken Gletscherseite entlang, weniger oft längs der rechten Seite und erst im untersten Teil zuweilen über den Gletscher zum Abfluß gekommen ist. Ein Überfließen des Wassers von der linken nach der rechten Seite hat zu wiederholten Malen stattgefunden.

## V. Die Temperatur der Gletscherbäche

### A. Allgemeines.

Die Besonderheiten, die die Temperatur der Gletscherbäche im Winter, zur Zeit ihrer kleinsten Wasserführung, bei ihrem Austritt aus dem Gletscher aufweist, sind meines Wissens noch nie untersucht und besprochen worden.

Systematische winterliche Temperaturmessungen an einer Reihe von Gletscherbächen unmittelbar bei ihrem Ursprung nächst der Gletschertore zur Zeit ihrer geringsten Wasserführung sind, soweit mir bekannt, überhaupt noch in keinem Lande ausgeführt worden. Auch Einzelmessungen liegen nur wenige vor.

Die frühere Vermutung, daß die Temperatur der Gletscherbäche am Ursprung  $0^{\circ}$  betrage, hat sich nicht bestätigt. Nach *Bénédict de Saussure*<sup>1)</sup> soll die Wassertemperatur, nach vielen Messungen, gewöhnlich  $2^{\circ}$  R, ja an einigen Orten sogar  $4^{\circ}$  R betragen. *Bischof*<sup>2)</sup> fand die Temperatur der Gletscherbäche, unmittelbar an ihrem Ausfluß aus dem Gletscher gemessen, stets etwas über  $0^{\circ}$ . So gaben ihm sechs Beobachtungen der Temperatur des dem *Unteren Grindelwaldgletscher* entfließenden Baches stets  $0,4^{\circ}$  R, während er am *Oberen Grindelwaldgletscher*  $0,6^{\circ}$  R fand. Auch die Gebrüder *Schlagintweit* geben derartiges Beobachtungsmaterial bekannt.<sup>3)</sup>

Über die Zunahme der Wassertemperatur mit der Entfernung vom Gletschertor besitzen wir Messungen von *L. Agassiz*<sup>4)</sup> am *Triftbach* und an der *Aare* und von *G. Greim*<sup>5)</sup> am *Jambach* in der *Silvrettagruppe*. Sie beziehen sich aber nur auf sommerliche Verhältnisse, weshalb ich von einer Bekanntgabe und Diskussion dieser Ergebnisse absehe. Es genügt, darauf hinzuweisen, daß mit der Zunahme der Entfernung vom Gletschertor, abgesehen von neuen Quellwasserzutritten, die Bäche stets in tiefere Regionen mit größerer Bodenwärme gelangen und auch der Reibung, die das Wasser auf der Sohle seines Bettes bei natürlich meist starkem Gefälle erzeugt, eine Rolle zufällt.

Die vorliegenden Ergebnisse sollen nicht nur der zu behandelnden Hauptfrage dienen, sondern auch einen bescheidenen Beitrag zur Lösung der Aufgabe des Temperaturverhaltens der Gletscherbäche im allgemeinen leisten.

Einleitend möchte ich vor allem darauf aufmerksam machen, daß es sich in der Temperaturbestimmung nur um Einzelmessungen zu verschiedenen Zeitpunkten und in ungleichen Meßlagen zum Gletschertor handelt. Soweit möglich wurde die Meßstelle unmittelbar am Gletschertor selbst gewählt oder doch so nahe, daß eine Temperaturänderung vom Gletschertor bis zur Meßstelle ausgeschlossen erschien. In den meisten Fällen mußte der Zugang zum Meßort direkt erkämpft werden. Es mußte eine Stelle aufgesucht werden, die relativ rasch von Schnee und Eis befreit werden konnte und sich zugleich für eine Messung der Temperatur und für eine Entnahme der Wasserproben

<sup>1)</sup> *Bénédict de Saussure*: Über die Höhen- und Temperaturveränderungen des Arvestroms. *Gilberts Annalen*, XXIV, 1806, S. 60.

<sup>2)</sup> *G. Bischof*: Die Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers, ein Inbegriff aller mit der Wärme in Beziehung stehenden Erscheinungen in und auf der Erde. Leipzig 1837.

<sup>3)</sup> *Adolph u. Hermann Schlagintweit*: Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen. Leipzig 1850, S. 285, Nrn. 30–37 u. S. 288, V.

<sup>4)</sup> *L. Agassiz*: *Système glaciaire. Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels.* Paris 1847.

<sup>5)</sup> *G. Greim*: Studien aus dem Paznaun. *Gerlands Beiträge zur Geophysik*, Bd. V, Heft 4. Leipzig 1903.

eignete. Besondere Schwierigkeiten verursachte meist der Zugang zu den Gletschertoren mit steilabfallenden Gletscherzungen in engen Felsschluchten. So wurden wir bei der Entnahme der Proben am steilen Zungenende des Unteren Grindelwaldgletschers in der wilden Lütchinenschlucht plötzlich von einem Hagel von Eisblöcken überrascht, der glücklicherweise erst nach Entnahme der Wasserproben eintrat und ohne Unfall verlief.

Mit der Entnahme von Wasserproben zur Durchführung der chemischen Analysen wurden an den in Untersuchung gezogenen Gletscherabflüssen auch *Temperaturmessungen* ausgeführt. Die Messungen erfolgten möglichst nahe den Gletschern, wo erreichbar, direkt an den Gletschertoren.

Um einen Einblick in die Zuverlässigkeit der Beobachtungen zu gewinnen, wurden die Temperaturen mit *zwei* geprüften, in  $\frac{1}{10}$ -Grade geteilten und empfindlichen Präzisions-Thermometern von C. Richter in Berlin gemessen und je nach der Größe der festgestellten Differenzen wiederholt.

Die Thermometer wurden möglichst waagrecht in die oberste Schicht getaucht und im Wasser abgelesen. Wärmeunterschiede, die durch Ein- und Ausstrahlung verursacht werden, machten sich, der ausgleichenden Wirkung der Strömungen wegen, nicht bemerkbar. Die Messungen konnten von einem dazu besonders qualifizierten Personal mit größter Sorgfalt ausgeführt werden, weshalb sie in allen Fällen streng vergleichbar sind.

Die in den Tabellen 1 und 2 niedergelegten Werte sind Mittel aus sämtlichen Messungen. In den meisten Fällen dürften sie der mittleren Temperatur des ganzen Bachprofils entsprechen. Die festgestellten Werte der Wassertemperaturen stellen mehrheitlich winterliche Einzelwerte dar. Sie fallen, hydrologisch beurteilt, in die Zeit der geringsten Wasserführung. Trotz ihrer bescheidenen Zahl verschaffen sie uns doch einen gewissen Einblick in das wechselvolle Verhalten der Wassertemperatur der Gletscherbäche bei ihrem Austritt aus dem Gletscher (bei den Gletschertoren).

Die Mannigfaltigkeit in der Entstehungsnatur der Gletscherabflüsse spiegelt sich in ihrem Temperaturverhalten. Einfache Verhältnisse werden zu verwickelten, namentlich dann, wenn nicht nur Lufttemperatur und Strahlung, sondern auch eine Reihe von Faktoren in Betracht fallen, deren Wesen unter Schnee und Eis zur Auswirkung gelangen. Das Maß des Einflusses der einzelnen Faktoren, die neben Lufttemperatur und Strahlung mitbestimmend wirken, ist sehr schwer zu ermitteln. Hierzu braucht es ein viel umfangreicheres und über den ganzen Winter ausgedehntes Material.<sup>1)</sup> Aus diesem Grunde muß ich leider auf eine ausführlichere Begründung des verschiedenen Verhaltens der einzelnen Faktoren zur Wassertemperatur verzichten. Dies soll allerdings nicht geschehen, ohne noch auf einzelne besonders klare und charakteristische Fälle im besondern einzutreten.<sup>2)</sup>

Noch ein Wort über die Lufttemperaturmessungen. Sie sind nicht frei vom Strahlungseinfluß und mußten zuweilen an Orten ausgeführt werden, die den Bedingungen einer einwandfreien Ermittlung nicht entsprachen. Die erzielten Ergebnisse dürfen deshalb nur als Annäherungswerte aufgefaßt werden.

<sup>1)</sup> Vgl. hierüber O. Lütchg: Wasserstand und Wassertemperatur der Visp in Stalden bei Visp, Wallis, Schweiz. – Geografiska Annaler 1928, H. 1 u. 2. Stockholm 1928.

<sup>2)</sup> Über die Besonderheiten, die die Temperatur der Gletscherwässer im Winter, zur Zeit ihrer geringsten Wasserführung, aufweist, habe ich mich erstmals in meiner Arbeit über den Märjelensee ausgesprochen. (Der Märjelensee und seine Abflußverhältnisse. Annalen der Schweiz. Landeshydrographie, Bd. I, Bern 1915. III. Teil: Die minimalen Abflußmengen der Gebirgsbäche, Kapitel II: Die winterlichen Abflußmengen der Gletscher, S. 323 ff.) Auf eine eingehende Behandlung dieses Themas durfte ich damals nicht eintreten, denn ich mußte mein Augenmerk vor allem den Abflußverhältnissen der Gletscherbäche zuwenden.

## B. Zusammenhang zwischen Wasser- und Lufttemperatur im jährlichen Gang.

Fragen wir uns noch, welcher Zusammenhang im jährlichen Gang zwischen Wasser- und Lufttemperatur für Gletscherbäche besteht, und stellen wir zu diesem Zwecke den Gang in Kurven dar, so kreuzen sich diese an zwei Stellen. Dies ist meist im April und Oktober der Fall, so daß also die Kurve der Wassertemperatur für das ganze Winterhalbjahr *über*, für das ganze Sommerhalbjahr dagegen *unter* der Kurve der Lufttemperatur verläuft. Es erklärt sich dieses Verhalten aus der Natur der betreffenden Gewässer, die alle von Gletschern gespeist werden und auch in ihrem Abflußregime – das in dieser Frage eine dominierende Stellung einnimmt – einen stark ausgeprägten eigenen Charakter besitzen. Ich rekapituliere kurz hierüber: Das hohe Relief des Gebietes vereitelt fast ganz den Abfluß der Niederschläge in der *Winterperiode*; es bringt den Abfluß in Verbindung mit der Lufttemperatur, weshalb sein Verlauf im Monatsmittel mit dem der Luftwärme nahe übereinstimmt. Die Spalten werden kleiner. Beim Schließen der Spalten regelieren ihre Wände. Das Retentionsvermögen wächst. Eine außergewöhnlich kleine und anhaltende Niederwassermenge während der ganzen Winter-, d. h. Kältezeit, mit Minimum im Februar–März, zeichnet das Regime besonders aus. Winterliche Anschwellungen treten nicht ein. Auch bei steigender Temperatur, z. B. bei Föhnlage, ja selbst bei beginnender Schneeschmelze und leichtem Regenfall,<sup>1)</sup> tritt infolge des großen Retentionsvermögens des Schnees und Gletschers kein merkliches Ansteigen der Abflußmenge ein.

Im schärfsten Gegensatz zu der knappen winterlichen Wasserführung steht der wasserreiche *Sommer* mit einer ausgesprochenen täglichen Periode der Wasserführung als Funktion der Strahlung und Lufttemperatur mit hohen Abflußspenden wegen der bei hohen Temperaturen eintretenden starken Schnee- und Gletscherschmelze.

Diese große Menge Wasser, die als Schmelzwasser eine Temperatur von nur wenig über 0° besitzt, überwiegt die warmen Zuflüsse aus Quellen und bewirkt ein starkes Zurückbleiben der Wassertemperatur gegenüber der Temperatur der Luft. Im Winter aber hört der Zufluß von Gletscherwasser fast ganz auf, der Gletscherbach wird dann fast nur von Quellen gespeisen, deren relativ hohe Temperatur allerdings nicht sehr weit bachabwärts zu verfolgen sein wird.

Nach dem Gesagten ergibt sich der jährliche Gang der Wassertemperatur. Das Wärmeregime bestimmt weitgehend den Verlauf des Abflusses und der Wassertemperatur. Die Kurve der Lufttemperatur wird natürlich steiler verlaufen als die der Wassertemperatur. Die Schnittpunkte werden nicht für alle Stationen dieselbe Lage aufweisen, ihre Veränderlichkeit wird aber eine bescheidene sein. Der Gang des Temperaturunterschiedes bei Gletscherbächen erreicht im Sommerhalbjahr größere Beträge als bei Quell- und Gebirgsflüssen. Die Gletscherbäche zeigen im Verhalten des Unterschiedes von Luft- und Wassertemperatur große Ähnlichkeit mit den Quell- und Gebirgsbächen, sie erreichen aber im Sommerhalbjahr größere Beträge als die letzteren.<sup>2)</sup>

Auf einen weiteren Punkt im Temperaturverhalten soll hier noch besonders aufmerksam gemacht werden. Die Temperatur der Quellen schwankt während des Jahres

<sup>1)</sup> Der Regen sickert in den Schnee ein und verdichtet die Schneedecke; die Fähigkeit des Schnees, Wasser aufzusaugen und festzuhalten, ist so groß, daß das Schmelzwasser bei eintretender Frühjahrsschmelze erst verspätet den Gletscherbach erreicht.

<sup>2)</sup> Vgl. O. L ü t s c h g : Wasserstand und Wassertemperatur der Visp in Stalden bei Visp, Wallis (Schweiz). Geografiska Annaler 1928, H. 10. 2. Stockholm 1928. – O. L ü t s c h g : Die tägliche Periode der Wassermenge der Matter Visp in Randa in der Trockenperiode vom 21. Juli bis 10. August 1921, Verhandlungen der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Jahresversammlung 1923 in Zermatt, II. Teil, S. 124–126. Aarau 1923.

nur um geringe Beträge. Nun ist die Lufttemperatur im Winter kälter, im Sommer bedeutend wärmer als das Quellwasser. Ebenso werden sich auch die den Quellen entströmenden Bäche, wenigstens eine Strecke weit, verhalten. Wie weit, das hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab, denen von Fall zu Fall nach Lage, Gestalt und Entfernung, nach Größe, Gefälle und Gliederung, nach Art und Gruppierung nachgegangen werden muß. Für Quellbäche, die in Gletscher münden und unter Eis und Schnee weiterfließen, fällt hauptsächlich die Abkühlung durch den Boden (sie wird in ihrem Effekt durch die Reibung auf dem Gletschergrund leicht eingeschränkt) und die Berührung mit Schnee und Eis in Betracht, andererseits vermag in der Regel die äußere winterliche Kälte nur einen bescheidenen Einfluß auf die Temperatur des Quellbaches auszuüben, weil sich der ganze Abflußvorgang wohlverborgen unter einer schützenden Schnee- und Eiskecke abspielt, d. h. die Tätigkeit des Wassers für Wärmeabgabe keine große sein kann, weshalb höhere Wassertemperaturen nächst den Gletschertoren doch als Indizien für Quellwasser anzusprechen sind.

### C. Die Ergebnisse.

#### a) Allgemeines.

Zunächst möchte ich hervorheben, daß den Meßergebnissen der Lufttemperatur natürlich die Zufälligkeit anhaftet, die jeder Einzelmessung in solchen Hochlagen und unter so ungleichen örtlichen Verhältnissen eigen ist. Es sind namentlich ungleiche Strahlungseinflüsse, die die Genauigkeit verschieden beeinträchtigen und einen Vergleich der Ergebnisse illusorisch machen. Zweifellos kommt den Werten der Lufttemperatur nur allgemein orientierender Charakter zu. Dies gilt für die Werte der Tabellen 1 und 2.

Für die Lösung der Herkunftsfrage des Wassers der Gletscherabflüsse mußten Thermometer von hoher Präzision verwendet werden. Für die Bestimmung der winterlichen Abflußverhältnisse genügten einfache, geprüfte, leicht transportable Thermometer.

Tabelle 1 dient der Herkunftsfrage, Tabelle 2 trägt allgemein orientierenden Charakter. Letztere ermöglicht einen ersten Einblick in das Temperaturverhalten der Gletscherbäche im Winter.

Auch den Werten der Wassertemperatur der Tabelle 2 ist manche Zufälligkeit eigen. Vor allem ist zu beachten, daß diese Messungen nicht an den Gletschertoren selbst, sondern an Orten ausgeführt wurden, die sich zur Ausführung von Präzisions-Wassermessungen besonders eigneten. Zugleich mußte auch der Lage in hydrographischer Beziehung Rechnung getragen werden. Die Problemstellung war eben eine ganz andere als die für die Ergebnisse der Tabelle 1: Hier handelt es sich um die Frage der *Herkunft* des Wassers, das den *Gletschertoren* im Winter entfließt, dort um die *Bestimmung der minimalen Abflüßmengen* der Hochgebirgsbäche im allgemeinen Sinne, wobei der Ermittlung der Wassertemperatur nur untergeordnete Bedeutung beigemessen werden konnte. Gewissermaßen als Nebenprodukt wurde sie der Untersuchung angegliedert und deshalb nur mit dem für *solche* Messungen notwendigen Instrumentarium ausgerüstet.

Überblickt man die Werte der Wassertemperaturen in Tabelle 1, so fällt zunächst auf, wie stark sie unter sich variieren:

Minimalwert	=	0,00° C	( <i>Glacier de Corbassière</i> , Nr. 32)
Maximalwert	=	6,07° C	( <i>Findelengletscher</i> , Nr. 21)
Differenz	=	6,07° C	

Neben dem Findelengletscher weisen folgende Gletscherabflüsse Werte über  $1,0^{\circ}\text{C}$

auf:	<i>Rosenlaugletscher</i> , Nr. 6, mit . . . . .	1,15 $^{\circ}\text{C}$ ,	17. 2. 1920
	<i>Fexgletscher</i> , Nr. 35, mit . . . . .	1,90 $^{\circ}\text{C}$ ,	7. 3. 1921
	<i>Oberer Grindelwaldgletscher</i> , Nrn. 9 u. 10, mit	1,88 $^{\circ}\text{C}$ ,	* 16. 2. 1920
	<i>Lötschenberggletscher</i> , Nr. 13, mit . . . . .	1,82 $^{\circ}\text{C}$ ,	24. 2. 1920
	<i>Kanderfirn-Alpetligletscher</i> , Nr. 12, mit . . . .	1,54 $^{\circ}\text{C}$ ,	23. 2. 1920
	<i>Fornogletscher</i> , Nr. 33, mit . . . . .	1,15 $^{\circ}\text{C}$ ,	8. 3. 1921
	<i>Allalingletscher</i> , Nr. 40, mit . . . . .	1,09 $^{\circ}\text{C}$ ,	23. 3. 1920

\* Mittelwert; Maximalwert 2,62 $^{\circ}\text{C}$ , Minimalwert 1,16 $^{\circ}\text{C}$ , 16. 2. 1920.

Der Allalingletscher fällt für unsere Untersuchungen deshalb außer Betracht, weil sein Abfluß aus der Differenz der Messungen an der Saaser Visp unmittelbar ober- und unterhalb der Zunge des Gletschers bestimmt werden mußte; der Allalingletscher befand sich zu dieser Zeit im Vorstoß, er überschritt die Visp auf eine Länge von 250 m.

Die übrigen in Untersuchung gezogenen Gletscherbäche, 23 von total 31, trugen Temperaturen zwischen 0 und  $1^{\circ}\text{C}$ .

#### b) Eigentümlichkeiten des Temperaturverhaltens.

*Findelengletscher* (Nr. 21). 29. März 1920, 8 Uhr 53: Entnahme der Wasserproben beim Gletschertor. – Messung der *Wassertemperatur* = 6,07 $^{\circ}\text{C}$ .

Der seit 1925 freigeschmolzene Untergrund des Gletscherendes wurde am 9. September 1945 von Geologe Dr. *H. Huber*, Zürich, auf Mineralquellen einer eingehenden Untersuchung unterworfen. Seinem Berichte folgend, möchte ich einleitend hervorheben, daß sich der Findelengletscher seit 1925 gewaltig zurückgezogen und ein weites Feld von verschwemmter Stirn- und Grundmoräne hinterlassen hat.

«Quellen im Bereiche der ehemaligen Gletscherzunge treten nur auf der Südseite des Gletscherbaches, am Fuße der alten Seitenmoräne, dort, wo sie auf der Grundmoräne aufsitzt, zutage. Ein besonders kräftiger Quellbach in einer Stärke von mindestens 1000, jedoch kaum mehr als 2500  $\text{min/l}$ , entspringt dem Fuße dieser Seitenmoräne auf der Höhe des Gletscherendes von 1920 bis etwa 1924. Die zahlreichen Quellpunkte dieses Baches sind auf eine Länge von etwa 150 m verteilt. Der Hauptast des Quellbaches fließt unmittelbar am Gletscherende 1920/24 (stationäres Stadium) vorbei und mündet etwas weiter nordwestlich in den Gletscherbach. Der hohe Mineralgehalt des Wassers ist ohne weiteres aus den dicken, krustenförmigen, gelbbraunen (Karbonat- und Sulfat-?) Absätzen auf allen Gesteinen und besonders Pflanzen (Moosen und Algen) im Quellbach ersichtlich. Solch reichliche Mineralabsätze fehlen allen anderen Quellen der unmittelbaren Umgebung. Andere, schwächere Quellaustritte finden sich weiter südwestlich auf dem Moränenplateau des Grünsees.»

Die Temperatur der Quelle dürfte nach Schätzung von Dr. *H. Huber* zwischen 5 $^{\circ}$  und 10 $^{\circ}\text{C}$  liegen, jedenfalls bedeutend höher sein als die Temperatur des Gletscherabflusses am 9. September 1945. *H. Huber* schließt seinen Bericht mit folgenden Worten: «Diese Beobachtungen lassen erkennen, daß die Wasserproben, die seinerzeit im Winter am Gletschertor genommen wurden, durch die Beimengung von Mineralwasser dieses Quellbaches stark beeinflusst wurden, ja es ist sogar wahrscheinlich, daß die Probe dem Quellbach selbst entstammt. Dadurch sind die außerordentlich hohen Gehalte an Trockenrückstand und Sulfaten leicht erklärlich.»

Hierzu möchte ich folgendes bemerken:

Die Frage, ob die am Gletschertor genommenen Wasserproben wirklich nur den erwähnten Quellbächen entstammen oder dem gesamten winterlichen Gletscherabfluß entsprechen, kann mit absoluter Sicherheit nicht abgeklärt werden. Zweifelsohne aber ist, daß einerseits der hohe Gehalt an Trockenrückstand, andererseits die hohe Temperatur

dieser Quellen den Chemismus und die Temperatur des Abflusses des Findelengletschers stark beeinflußt haben. Ich habe den Eindruck, daß diese Wasserprobe außer dem Mineralwasser doch noch anderes Wasser enthielt. Auch Chemiker *Paul Huber* vertritt diese Ansicht, namentlich deshalb, weil die für Quellwasser typischen Sulfate hier eher vermindert erscheinen.

Am 18. Februar 1904 habe ich die Wasserführung des Findelenbaches, 10 m aufwärts seiner Mündung in die Matter Visp, zu  $200 \text{ l/sec} = 4,6 \text{ l/sec/km}^2$  bestimmt. Das abgeleitete Minimum ergab für den 9. und 15. März 1904  $162 \text{ l/sec} = 3,8 \text{ l/sec/km}^2$ . Im Vergleich mit den Meßergebnissen der Matter Visp, 40 m oberhalb der Mündung des Findelenbaches, vom 18. Februar 1904:  $391 \text{ l/sec} = 2,4 \text{ l/sec/km}^2$ , abgeleitetes Minimum für den 9. März 1904:  $361 \text{ l/sec} = 2,2 \text{ l/sec/km}^2$ , zeigt der Findelenbach mit seinen Abflußspenden von 4,6 und  $3,8 \text{ l/sec/km}^2$  recht *hohe* Werte. Sie weisen auf einen recht großen Quellertag seines Einzugsgebietes hin und sind deshalb ein weiterer wichtiger Beleg dafür, daß der subglaziale Gletscherbach bei seinem Austritt aus dem Gletscher vorwiegend aus Quellwasser besteht. Weiter ist auch die im Vergleich mit der Matter Visp wesentlich höhere Wassertemperatur des Findelenbaches vom 18. Februar 1904 (Matter Visp =  $2,2^\circ \text{C}$ , Findelenbach =  $3,8^\circ \text{C}$ ) ein Indiz für Quellwasser.

*Oberer Grindelwaldgletscher* (Nrn. 8 u. 9). 16. Februar 1920, 12 Uhr 40 und 13 Uhr 57: Entnahme der Wasserproben an der Gletscherstirne. – Messung der *Wassertemperatur*:

Nr. 8. Bei der Betonbrücke nächst der Gletschertore =  $1,26$  und  $1,16^\circ \text{C}$ .

Nr. 9. Etwas links der Betonbrücke nahe beim Gletschertor =  $2,48$  und  $2,62^\circ \text{C}$ .

*Mittelwert* =  $1,88^\circ \text{C}$ .

Am 15. Februar 1908, anlässlich der Ausführung einer Wassermessung an der Lutschine, 9 m unterhalb der ehemaligen Betonbrücke (sie wurde vom Gletschervorstoß 1910/24 zerstört), also nicht am Gletschertor, ergab die Messung der *Wassertemperatur* =  $0,9^\circ \text{C}$ . Mit  $1,16$  bis  $2,62^\circ \text{C}$  steht der *Obere Grindelwaldgletscher* an *zweiter* Stelle der Gletscherbäche mit relativ hohen Temperaturen. Auch bei diesem Gletscher liegen klare Verhältnisse vor. Es sind wiederum die in Nähe der Gletscherzunge befindlichen und ihr zufließenden Quelladern, namentlich die vom Mettenberg (links) und die des Wyßbaches (rechts), die die relativ hohen, aber ungleich großen Temperaturen der örtlich getrennten Wasseraustritte an der Gletscherstirne bedingen.<sup>1)</sup>

Gerade diese Ungleichheit in Temperatur und Lage spricht eine deutliche Sprache für den quellwasserlichen Ursprung dieses winterlichen Gletscherwassers. Der relativ hohe Gehalt an Mineralstoffen legt ebenfalls Zeugnis ab, daß es sich auch bei diesen Gletscherabflüssen vor allem um Quellwasser handelt. Es ist nicht ausgeschlossen, daß auch das große Gefälle, das diesen Wasseradern von den Quellorten bis zu den Aus-

<sup>1)</sup> Auf eine starke Quelle am linken Rand der Zunge des Oberen Grindelwaldgletschers oberhalb dem Chalet Milchbach, nahe der Örtlichkeit «Im Schlupf», deren Wasser in eine Randklüft stürzte, ist auch Dr. H. Carol, Zürich, bei seinen Untersuchungen über die Randklüfte dieses Gletschers in den Jahren 1941 und 1942 gestoßen (vgl. seine Ausführungen in den Mitteilungen der Geographisch-Etnographischen Gesellschaft in Zürich, Bd. XLII (1943/45, S. 12-51).

Er schreibt hierüber folgendes: «Solche Felsquellen sind in der Umgebung ziemlich zahlreich, sie treten aber meist hoch über dem Gletscher aus und rieseln als dünne Silberfäden über die Felsen. Im Dezember (1941) fand ich sie wieder, aber in Form von langen Eisfäden. Im Gegensatz dazu lag die erwähnte Quelle im Dezember nur 0,5 m über dem Klüftboden und war im April vollständig von der steigenden Eisflut begraben. Derart vor dem Vereisen geschützt, ergießt sie sich, solange die Wasserführung anhält, unter den Gletscher.»

Es ist wichtig, den Ausführungen Carols noch beizufügen, daß sie sich auf winterliche Verhältnisse mit *sehr geringen* Schneemengen beziehen. Andere Zustände liegen zweifellos vor, wenn die Felsquellen unter dem Schutze eines mächtigen Schneemantels dem Gletscherrand zuzufließen vermögen, d. h. ihr Wesen treiben.

trittstellen am Zungenende innewohnt, einen gewissen Einfluß auf ihr Temperaturverhalten auszuüben vermag.

*Unterer Grindelwaldgletscher* (Nr. 11). 16. Februar 1920, 17 Uhr 53: Entnahme der Wasserproben am Gletschertor unmittelbar am Steilabfall des Zungenendes. *Wassertemperatur* =  $0,63^{\circ}\text{C}$ .

Dem Oberen Grindelwaldgletscher stelle ich nun gleich das Temperaturverhalten des Unteren Grindelwaldgletschers gegenüber. Ein Blick auf die Karte genügt, um zu erkennen, daß sich die beiden benachbarten Gletscher in ihren Lage-, Größen- und Formverhältnissen<sup>1)</sup> zum Teil sehr verschieden zueinander verhalten:

	Oberer Grindelwaldgletscher	Unterer Grindelwaldgletscher
Exposition . . . . .	NW	N
Fläche . . . . .	10,90 km <sup>2</sup>	28,54 km <sup>2</sup>
Größte Länge . . . . .	6,20 km	10,10 km
Mittlere Neigung   Firn . . . . .	28 <sup>o</sup>	32 <sup>o</sup>
Zunge . . . . .	37 <sup>o</sup>	24 <sup>o</sup>
Höhe des Gletscherendes . . . . .	1350 m	1080 m
Mittlere Höhe . . . . .	2810 m	2820 m
Firngrenze . . . . .	2650 m	2600 m
Flächenverhältnis Firn:Zunge (Zunge = 1)	4,8	2,2

Wenn wir erwägen, daß auch das Einzugsgebiet des Unteren Grindelwaldgletschers relativ reich an Quellen ist, und die oben niedergelegten Werte in Rechnung stellen, so dürfte, trotz der wesentlich niedrigeren Temperatur, der Abfluß des Unteren Grindelwaldgletschers durchaus den Charakter eines Quellbaches tragen.

*Rosenlaugletscher* (Nr. 6). 17. Februar 1920, 15 Uhr 55: Entnahme der Wasserproben etwas unterhalb des rechten Armes der Gletscherzunge. – *Wassertemperatur* =  $1,15^{\circ}$ .

Dieser Gletscher verdient deshalb besondere Beachtung, weil ihm historische Bedeutung zufällt. Aus dem Abschnitt «Historisches» (S. 20/21) ist ersichtlich, daß gerade der Rosenlaugletscher von den beiden Pionieren unserer Gletscherforschung, *L. Agassiz* und *Ed. Desor*, für die Klärung unserer Hauptfrage als besonders geeignet erschien und deshalb einer eingehenden Besichtigung und Untersuchung unterworfen wurde. Die Begehung fand im März 1841 statt.

Zunächst einige Daten über Lage, Größe und Form dieses Gletschers: Exposition = N – Fläche = 6,59 km<sup>2</sup> – Größte Länge = 5,2 km – Mittlere Neigung des Firns = 24<sup>o</sup>, der Zunge = 34<sup>o</sup> – Höhe des Gletscherendes = 1710 m – Mittlere Höhe = 2910 m – Firngrenze = 2700 m – Flächenverhältnis, Firn zu Zunge (Zunge = 1) = 3,4.

Über weitere Einzelheiten verweise ich auf die Ausführungen von *Agassiz* und *Desor*, die ich im Abschnitt «Historisches» in extenso wiedergegeben habe.

#### D. Zusammenfassung der Ergebnisse.

Es kann nicht meine Aufgabe sein, jeden einzelnen Gletscherabfluß auf sein Temperaturverhalten zu interpretieren. In dieser Beziehung möchte ich vor allem auf die Beiträge von *Dr. F. de Quervain* und *Dr. H. Huber* und im besondern auf ihre wertvollen Ausführungen über die Beziehungen zwischen Wassertemperatur und Trockenrückstand hinweisen. Allgemeine Regeln lassen sich nicht aufstellen, das Problem trägt zu komplexen Charakter. Die Temperatur eines Gletscherabflusses im Winter, also zur Zeit

<sup>1)</sup> Vgl. *Hans Heß*: Die Gletscher. Tabelle S. 72/73. Braunschweig, 1904.

seiner kleinsten Wasserführung, ist eben das Produkt aller Faktoren – und ihre Zahl ist keine kleine –, die bis zur Austrittsstelle dessen Temperatur zu beeinflussen vermögen, d. h. die Temperatur stellt die Summe aller Einflüsse dar, die bis zur Meßstelle am Gletschertor, erst auf jede einzelne Wasserader des Einzugsgebietes, dann auf den subglazialen Hauptbach selbst, zur Auswirkung gelangen. Dieser Vorgang vollzieht sich nicht in allen Teilen zugleich, sondern nacheinander während des Fließens bestimmter Wasserquantitäten. Deshalb kommt auch der Länge (Distanz) und dem Gefälle Bedeutung zu. Es braucht keine weiteren Erläuterungen; die Entwicklung zu einer bestimmten Temperatur des Gletscherbaches am Gletschertor stellt einen recht verwickelten Vorgang dar. Er wird in seinem Werdegang nur dadurch ein etwas einfacherer, weil er sich in der Regel unter dem Schutze eines mächtigen Schneemantels abwickelt, dadurch also dem äußeren atmosphärischen Einfluß meist nicht ausgesetzt ist. Damit im Zusammenhang steht nicht nur der Kälte-, sondern auch der Strahlungseinfluß; beide vermögen nur in sehr bescheidenem Maße die Schneedecke zu durchdringen, weshalb die Temperatur der Erdoberfläche unter Schnee und Eis der Nullisotherme auch nahestehen muß.

Mit dem Quellertrag eines Gletschertales und dem Lageverhältnis der einzelnen Quellen und Quellsysteme zum Gletscher und Gletschertor stehen natürlich Temperatur, Chemismus und Abfluß in enger Beziehung. Hohe Bedeutung kommt ferner der Lage, Größe und Gestalt des Gletschers als solcher zu. Sie bestimmen vor allem das Wesen und die Größe des Zurückhaltevermögens des Gletschers, dessen Einfluß auf Abfluß, Temperatur und Chemismus nicht hoch genug eingeschätzt werden kann. Im Temperaturverhalten des Gletscherabflusses steht dieser Faktor wohl an erster Stelle. Das Zusammenspiel sämtlicher Faktoren, die die Temperatur des Gletscherabflusses bestimmen, ist eben von einer unerhörten Mannigfaltigkeit, deshalb auch die stark ausgeprägten Unterschiede in der Größe der Temperatur von Gletscherabfluß zu Gletscherabfluß. Eine Begehung der Gletscher in der Zeit der ersten kräftigen Frühjahrsschmelze zeigt uns die Wirkung des Retentionsvermögens der Gletscher in kaum überbietbarer Weise. Ich denke dabei namentlich an meine Frühjahrswanderungen auf dem Großen Aletschgletscher im Mai 1913. Ein Randseelein reihte sich ans andere an. Gegen Ende Oktober desselben Jahres fand ich sämtliche Becken in entleertem Zustande wieder vor. Ähnliche Verhältnisse trafen wir am Rhonegletscher und auf den Gletschern der Vispgebiete. Es wäre nicht schwer, eine weitere gute Anzahl von Gletschern zu ermitteln, bei denen die Summe der vorhandenen Rückhalte ebenso groß wäre.

Jeder Gletscher trägt einen stark individuellen Charakter, was nicht sagen will, daß sich die Gletscher in ihrer Gesamtheit nicht in bestimmte Gruppen einteilen lassen. Daß dies nicht leicht durchführbar ist, geht aus unseren Untersuchungen einwandfrei hervor. Eine solche Einteilung kann nur mit genauer Berücksichtigung der Ortsverhältnisse vorgenommen werden. Nur unter Beachtung aller Gesichtspunkte lassen sich die Eigentümlichkeiten eines Gletschers so weit ergründen, daß auch das Wesen der Wassertemperatur seines Abflusses beim Gletschertor nicht mehr rätselhaft bleibt.

### E. Schluß.

In der vorliegenden Betrachtung haben wir versucht, die Eigenart, das Wesen, die Zusammenhänge zwischen Temperatur, Chemismus, Mineralgehalt (in Verbindung mit der Gesteinszusammensetzung) der Gletscherabflüsse im Winter, zur Zeit ihrer kleinsten Wasserführung, darzustellen und zu ergründen. Dabei ist uns eine Reihe von Fragen entgegengetreten, die im wesentlichen wie folgt lauten:

1. In welchen Beziehungen steht die winterliche Wasserführung der Gletscherabflüsse zur Abschmelzung des Gletschers an seiner Unterfläche durch die Erdwärme, zur inneren

Schmelzung durch die Reibungswärme, durch Druckschwankungen, durch Kompression, zum allmählichen Aussickern des vom Sommer her aufgespeicherten Schmelzwassers?

2. Welchen quantitativen Anteil nimmt das im Einzugsgebiet des Gletschers oberflächlich und subglazial auftretende Quellwasser an der Abflußmenge des Gletscherbaches?

3. Handelt es sich beim Gletscherabfluß um Schmelz- oder Quellwasser oder um beide Arten oder nur um die eine oder die andere?

Zur Klärung dieser Fragen sind folgende Untersuchungen ausgeführt worden:

- a) Geschichtliche Nachforschungen – Klarlegung der älteren Ansicht;
- b) Entnahme von Wasserproben im Verlauf der Winter 1920 und 1921 an den Toren von 29 nach Lage, Gestalt und Geologie verschiedenen Gletschern;
- c) Durchführung von Gesamtanalysen dieser Wasserproben;
- d) Messung der Temperatur dieser Gletscherabflüsse mittels peinlichst geprüfter Präzisionsthermometer;
- e) Studium der Zusammenhänge zwischen dem Mineralgehalt von Wintergletscherwässern und der Gesteinszusammensetzung;
- f) Begehungen von Gletschern zur Erforschung ihrer Untergrundverhältnisse.

Das Wasser der Gletscherabflüsse im Winter beim Verlassen des Gletschertores kann folgenden Ursprungs sein, d. h. auf folgenden Vorgängen beruhen:

1. Quellbäche, die in den Gletscher münden, und Quellen, die vom Untergrund des Gletschers stammen, also subglazialen Charakter tragen.

2. Allmähliches Aussickern des vom Sommer her in den Randseen, den Eisseen und in den Spalten oberflächlich und subglazial aufgespeicherten Schmelz-, Niederschlags- und Quellwassers.

3. Schmelz-, Niederschlags- und Quellwasser von langsam oder schneller sich vollziehenden (entwickelnden) Seeausbrüchen (Rand- und Eisseen).

4. Schmelzwasser auf Kosten der Erdwärme, von der unteren Fläche des Gletschers herkommend.

5. Schmelzwasser auf Kosten innerer dynamischer Wärmequellen: Druckschwankungen, Reibung und Kompression.

Diese Vorgänge bestimmen natürlich qualitativ und quantitativ die chemische Zusammensetzung des Gletscherwassers, die je nach Jahreszeit verschieden ausfallen muß. In gewissem Grade bestimmen sie auch die Wassertemperatur. Dagegen kommt den Faktoren Bestrahlung, Lufttemperatur (Abschluß gegen Kaltluft), Bewölkung, Wind und Niederschlag wenigstens so lange nur untergeordnete Bedeutung zu, als eine mächtige Schneedecke jeglichen äußeren Einfluß zurückhält.

Während meiner nun fünfzigjährigen Tätigkeit im Schweizer Hochgebirge habe ich mich stets mit besonderem Interesse den vorliegenden Fragen gewidmet, sie gehörten stets in den Kreis meiner Lieblingsaufgaben. Indem ich die Eigentümlichkeiten solcher Gletscherwasser zu schildern und zu klären suchte, konnte nicht alles als unwiderleglich zweifellos hingestellt, sondern es mußten da und dort Zweifel erhoben werden. Immerhin glaube ich doch, in der Kernfrage des ganzen Problems, nämlich des Einflusses der Erdwärme auf den Schmelzprozeß an der Unterfläche des Gletschers, zu einem endgültigen Ergebnis gekommen zu sein: Von irgendeinem Einfluß der Erdwärme auf die Schmelztätigkeit des Gletschers und auf das Verhalten der Temperatur des Gletscherabflusses darf, praktisch beurteilt, *nicht gesprochen werden*.

## VI. Chemismus

Von P. Huber

### A. Einleitung.

Die großen Schweizerseen und auch eine beträchtliche Zahl der kleineren Alpenseen haben schon zum Teil recht eingehende Untersuchungen erfahren. Ich brauche nur an die Werke von *F. A. Forel*<sup>1)</sup>, *Thoulet*<sup>2)</sup>, *J. Zender*<sup>3)</sup>, *Dr. F. Nipkow*<sup>4)</sup>, *Dr. Bourcart*<sup>5)</sup> u. a. zu erinnern. Weniger reich ist die Literatur an Analysen laufender Gewässer. Von Rhein und Rhone existieren schon ziemlich zahlreiche Analysen. Wohl die eingehendste Untersuchung, allerdings mehr vom hygienischen als vom chemischen Standpunkt aus, hat die Glatt durch die schöne Arbeit von *Dr. Waser* und *Dr. Blöchli*<sup>6)</sup> erfahren. Dagegen finden wir, außer den durch *Dr. Lütsch* veranlaßten, nur sehr zerstreute Analysen von Schweizer Gebirgsgewässern. Die im Anschluß an die sogleich zu erörternde Frage ausgeführten, wenn auch nur summarischen Analysen verschiedener Gebirgsgewässer dürften daher neben den Gesamtanalysen der Gletscherabflüsse als Beiträge zum «Chemismus der Schweizer Gewässer» ihre Berechtigung haben. Doch kehren wir zur erwähnten Frage zurück, welche die Untersuchungen speziell der Gletscherabflüsse veranlaßte.

Schon lange hatte man festgestellt, daß den großen Gletschern während des ganzen Winters ein zwar kleiner, aber sozusagen nie versiegender, meist klarer Bach entspringt. Da zu dieser Zeit von einer oberflächlichen Wasserzufuhr natürlich keine Rede sein kann, stand man von jeher vor der Frage nach der Herkunft dieser winterlichen Gletscherabflüsse.

*Albert Heim* sagt in seinem «Handbuch der Gletscherkunde» (S. 262):

«Das Wasser der Gletscherbäche im Winter ist von verschiedenen Ursachen, zunächst in Beziehung auf die Alpen, abgeleitet worden, und zwar von:

- a) allmählicher Aussickerung des im Sommer in den Haarspalten schwammartig aufgespeicherten Wasserüberflusses (Schlagintweit u. a.);
- b) Quellen unter den Gletschern (Agassiz u. a.);
- c) innerer Schmelzung durch den Mechanismus der Bewegung, Druck (Thomson), Reibung am Grunde usw. (Weyprecht, teilweise);
- d) Erdwärme (Saussure u. a.).»

Derselbe Autor spricht sich etwas weiter oben (S. 246 ff.) in dem Sinne aus, daß besonders bei mächtigen Gletschern, deren Ende beträchtlich unterhalb der Bodentemperatur von 0° C (etwa 2800 m ü. M. für die Alpen) liegt, sehr wahrscheinlich auch im Winter eine Abschmelzung durch Erdwärme erfolge. Allerdings fehlen nach ihm einige Mes-

<sup>1)</sup> F. A. Forel: Le Léman. 1892.

<sup>2)</sup> J. Thoulet: L'étude des lacs en Suisse. Arch. des missions scient. et littér., publ. sous les auspices du ministère de l'industrie publ. et des Beaux Arts. 1890.

<sup>3)</sup> J. Zender: Sur la composition chimique de l'eau et des vases des grands lacs de la Suisse. Thèse. Genève 1908.

<sup>4)</sup> Dr. F. Nipkow: Neue Untersuchungen über die Ablagerungen im Grunde einiger großer Schweizer Seen, mit besonderer Berücksichtigung des Zürichsees. Preisarbeit der Schläfli-Stiftung. Zürich 1932.

<sup>5)</sup> Dr. F. E. Bourcart: Les lacs alpins. Thèse. Genève 1906.

<sup>6)</sup> Prof. Dr. E. Waser, Dr. ing. W. Husmann und Dr. G. Blöchli: Die Glatt. Bern 1934.

sungen für die Voraussetzungen, welche zu diesem Schluß führen. «Die einzige Beobachtung, welche mir als Folge der Abschmelzung auch im Winter erscheint, sehe ich im Schwinden der Gletscher im Winter bei Fehlen aller Abschmelzung von oben, bei Verschuß aller unter den Gletscher gehenden Luftwege durch Schnee.»

Ausführlich äußerte sich schon der Schweizer Geologe *Arnold Escher* (v. d. Linth) über diese Frage, wie wir der Abhandlung von Dr. *G. Bischof*: Die Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers, entnehmen. *Escher* (Gilberts Ann. LXIX, 113) hält dieses Abschmelzen für eine Tatsache, die niemand leugnen wird, der die Gletscher mit einiger Umsicht beobachtete. «Sie würden», sagt dieser Alpenforscher, «bald die obersten Kanten ihrer Seitengebirge erreichen, wenn nicht die innere Wärme der Erde sie an ihrer unteren Fläche abschmelzte und so die Unterhöhlungen und Einsenkungen bewirkte, durch welche das Gleichgewicht in der Gletschermasse zwischen der oberflächlichen Anhäufung oder Nahrung und dem unterirdischen Abfluß bleibend unterhalten wird. Dadurch allein wird der Abfluß der Quellen aller Ströme unter den Gletschern bewirkt, welcher auch im Winter ununterbrochen statthat. Nur da, wo diese hohen vergletscherten Längentäler der Alpen durch Quertäler geöffnet sind, oder wo vergletscherte Hochgebirge ihren Fuß bis in tiefere Täler erstrecken, wird die hoch aufgetürmte Gletschermasse über die steilen Abhänge in die tieferen, unter der ewigen Schneegrenze liegenden Täler herabgedrängt und durch eigene Schwere vorwärts geschoben, und hier schmelzt sie an ihrer unteren Fläche ununterbrochen, an ihrer oberen Fläche aber nur während der wärmeren Jahreszeit ab.»

«Das Abschmelzen der Gletscher an ihrer unteren Fläche kann möglicherweise nur da stattfinden, wo die mittlere Bodentemperatur über Null ist. Denn in jenen Höhen, wo dieselbe auf oder gar unter Null herabsinkt und wo die Bedeckung des Bodens durch den Gletscher den Zutritt der warmen Sommerluft verhindert, kann kein Schmelzen des Eises auf der unteren Fläche der Gletscher mehr stattfinden. Nehmen wir an, daß ein Alpental, dessen mittlere Temperatur  $0^{\circ}$  ist, zu einer Zeit mit einem Gletscher bedeckt wird, wo die Temperatur der Oberfläche gerade  $0^{\circ}$  ist, und daß die Schneemassen dieselbe Temperatur haben, so wird der Schnee von dem Boden weder Wärme empfangen noch an sie abgeben. Ist der Boden über  $0^{\circ}$ , so wird dieser Wärmeüberschuß einen Teil Schnee abschmelzen, bis das Gleichgewicht hergestellt ist. Im umgekehrten Falle wird der Boden Wärme von dem Schnee empfangen. Die normale Temperaturabnahme von dem Innern der Erde bis zur Oberfläche wird also durch eine Schneebedeckung an einer Stelle nicht dauernd gestört, wo die mittlere Bodentemperatur  $0^{\circ}$  ist, und es ist daher nicht denkbar, wie von dem Innern bis dahin jemals ein stärkerer Zug von Wärme stattfinden sollte, welcher vermögend wäre, Schnee zu schmelzen. Durch die Schneebedeckung wird weiter nichts geändert, als daß die Temperaturveränderungen des Bodens, als Folge des Wechsels der Jahreszeiten, in sehr enge Grenzen eingeschlossen werden, ja, daß sie, wenn die Schneebedeckung sehr mächtig ist, ganz verschwinden.»

Bei näherer Betrachtung der erwähnten Ursachen drängt sich der Gedanke auf, daß sie zum Teil Schmelz-, zum Teil dagegen ausgesprochenes Quellwasser liefern müssen, nämlich a, c und d Schmelzwasser, b jedoch Quellwasser. Jedenfalls ist zu erwarten, daß die chemische Analyse wertvolle Anhaltspunkte zu geben imstande sein wird. Andererseits muß hier sofort auf die Schwierigkeit der Definition dieser beiden Begriffe in bezug auf chemische Zusammensetzung hingewiesen werden. Reines Schmelzwasser müßte theoretisch etwa mit Regenwasser übereinstimmen. Bis zu seinem Erscheinen am Ausfluß des Gletschers kommt es aber fast immer in etwelche Berührung mit dem Gestein. Bei Quellwasser sind für jeden Bestandteil sozusagen alle Werte von 0 bis zur Sättigung denkbar. Einwandfreies Vergleichsmaterial kann in diesen Fällen nicht leicht beigebracht werden.

Nur ein sehr umfangreiches Material kann uns mit Berücksichtigung möglichst vieler Faktoren schrittweise der Lösung der verschiedenen sich aufdrängenden Fragen näher bringen.

Mehr oder weniger eingehende Analysen von Gletscherabflüssen waren bis dahin nur vereinzelt ausgeführt, bzw. veröffentlicht worden. Wohl die ältesten stammen von den Gebrüdern *Schlagintweit* (Untersuchungen über die physik. Geographie der Alpen, 1850) und betreffen die Abflüsse des Pasterngletschers (Möll) und der Hintereis-, Hochjoch- und Vernagtgletscher (Oetz). Beide Abflüsse sind übrigens nicht unmittelbar am Gletscher selber, sondern etwas unterhalb, bei Heiligenblut für die Möll, bei Vent für die Oetz gefaßt worden. Das Einzugsgebiet beider Gewässer besteht aus kristallinen Schiefen. Leider ist das Datum aus der betreffenden Notiz nicht ersichtlich. Wir geben die Zahlen in mg/l an und zur Erleichterung eines Vergleiches ferner noch in Ionen, soweit diese sich zahlenmäßig berechnen lassen:

	Möll b. Heiligenblut 1153 m ü. M. mg/l	Oetz b. Vent 1737 m ü. M. mg/l
CaCO <sub>3</sub>	8,4	4,5
MgCO <sub>3</sub>	3,5	0,05
SiO <sub>2</sub>	7,2	8,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	—
MnO	3,2	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spur	Spur
CaSO <sub>4</sub>		13,0
MgSO <sub>4</sub>	Spuren	Spur
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		—
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		—
NaCl	0,9	0,43
KCl		
Suspendierte Stoffe	1,9	8,53
Kaliumion K'	0,24	0,11
Natriumion Na'	0,18	0,08
Calciumion Ca''	3,36	5,63
Magnesiumion Mg''	1,01	0,01
Ferroion Fe''	0,70	—
Manganion Mn''	2,48	—
Aluminiumion Al'''	Spur	Spur
Chlorion Cl'	0,49	0,23
Sulfation SO <sub>4</sub> ''	Spuren	9,17
Hydrocarbonation HCO <sub>3</sub> '	15,31	5,56
Metakieselsäure H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	9,36	11,28

An anderer Stelle finden wir noch folgende Zahlen für den «nach sorgfältigem Eindampfen» erhaltenen Rückstand aus 10 000 Teilen Wasser:

Möll bei Heiligenblut	0,8007 g (= 80,07 mg/l)
Oetz bei Vent	0,6701 g (= 67,01 mg/l)

Da diese Zahlen das 3,3-, bzw. 2,5fache des entsprechenden Betrages der ersten Analysen ausmachen, ist zu vermuten, daß die Hauptanalysen an Sommerwasser, die Rückstandsbestimmungen an Winterwasser ausgeführt wurden.

Fast aus gleicher Zeit dürfte eine Analyse von *Jules Granges* am Wasser des Glézingletschers, dem Quellbach der Isère, stammen, welche den Anfang einer ganzen Serie

von Gewässeranalysen des Isèretales bildet (aus Dr. *Herm. Ludwig*: Die natürlichen Wässer in ihren chemischen Beziehungen zu Luft und Gesteinen, Erlangen 1862).

		<b>Glézingletscher</b>
		2259 m ü. M.
Temperatur des Wassers . . . . .		0,4° C
Temperatur der Luft . . . . .		8,0° C
		mg/l
Chlormagnesium . . . . .		4,3
Chlornatrium . . . . .		3,7
Schwefelsaures Kalium und Natrium . . . . .		3,5
Schwefelsaurer Kalk . . . . .		1,8
Schwefelsaures Magnesium . . . . .		0
Kohlensaurer Kalk . . . . .		4,7
Kohlensaure Magnesia . . . . .		0,1
Kieselsäure und Tonerde . . . . .		2,0
Kohlensäure . . . . .	cm <sup>3</sup> /l	8
Sauerstoff + Stickstoff . . . . .	cm <sup>3</sup> /l	1,8
Daraus berechnet:		
Kaliumion K <sup>+</sup> (aus der Hälfte der schwefelsauren Alkalien) . . . . .		0,79
Natriumion Na <sup>+</sup> (aus Chlornatrium + Hälfte der schwefelsauren Alkalien) . . . . .		2,03
Calciumion Ca <sup>++</sup> . . . . .		2,41
Magnesiumion Mg <sup>++</sup> . . . . .		1,13
Chlorion Cl <sup>'</sup> . . . . .		5,44
Sulfation SO <sub>4</sub> <sup>''</sup> . . . . .		3,42
Hydrocarbonation HCO <sub>3</sub> <sup>'</sup> . . . . .		7,18
Metakieselsäure H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (Tonerde unberücksichtigt) . . . . .		2,60

Nur bedingt als Gletscherwasseranalyse anzusehen ist die von *G. Bischof* (Lehrbuch der chem. u. phys. Geologie, Bd. II, S. 1520) angeführte Untersuchung des Wassers der Lütschine durch *Pagenstecher*. Von der Lütschine wird gesagt: «Diese kommt aus dem Unteren Grindelwaldgletscher und fließt in die Aare. Das Wasser wurde im Herbst beim Grindelwald geschöpft.» Es ist daraus also nicht ersichtlich, ob es sich ausschließlich um den Abfluß des Unteren Grindelwaldgletschers oder um die Lütschine nach Zufluß dieses Abflusses handelt. Der Vollständigkeit halber geben wir auch diese Analyse in mg/l an.

<b>Lütschine bei Grindelwald</b>			
	mg/l		mg/l
CaCO <sub>3</sub>	40,5	Natriumion Na <sup>+</sup>	2,87
MgCO <sub>3</sub>	1,9	Calciumion Ca <sup>++</sup>	25,25
SiO <sub>2</sub>	3,5	Magnesiumion Mg <sup>++</sup>	3,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	Aluminiumion Al <sup>+++</sup>	0,53
CaSO <sub>4</sub>	30,7		
MgSO <sub>4</sub>	14,9	Chlorion Cl <sup>'</sup>	4,43
NaCl	7,3	Sulfation SO <sub>4</sub> <sup>''</sup>	33,55
		Hydrocarbonation HCO <sub>3</sub> <sup>'</sup>	52,12
Summe	99,8	Metakieselsäure H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	4,55

Im Anschluß an diese Analysen älteren Datums mögen hier nun noch 8 summarische Analysen von typischen Gletscherabflüssen neueren Datums angeführt werden, welche auf Veranlassung des Hauptautors, Dr. *O. Lütshg*, damals Oberingenieur des Schweiz. Amtes für Wasserwirtschaft, durch Prof. Dr. *R. Mellet* in Lausanne ausgeführt wurden und wertvolle Ergänzungen zu unseren eigenen Analysen bilden.



Die Analysen 5 und 7 sind deshalb von besonderem Interesse, weil bald darauf der Allalingletscher bis über den Ausfluß des Mattmarksees (Saaser Visp) vorrückte, wodurch der Ausfluß des Allalingletschers als solcher unzugänglich wurde.

Vorstehende Analysen zeigen zunächst beträchtliche Verschiedenheiten je nach der geologischen Struktur des Einzugsgebietes. Die in letzter Linie aufgeführten Analysen lassen zudem die Verschiedenheit der in Lösung gehenden Substanzmengen je nach der Jahreszeit erkennen. Damit ist aber gleichzeitig die Vergleichbarkeit der früheren Analysen ohne Angaben über den Zeitpunkt der Fassung in Frage gestellt. Außerdem weisen namentlich die älteren Analysen einige schwer verständliche Einzelheiten (hoher Kieselsäuregehalt bei Möll und Oetz, hoher Chlorgehalt bei Glézingletscher usw.) auf, so genau im übrigen die Untersuchung gewesen sein mag. Sie können also nur bedingt zum Vergleich mit unseren Ergebnissen herangezogen werden und lassen besonders wegen der beschränkten Zahl der Angaben keine sicheren Schlüsse in bezug auf die erwähnten Probleme zu.

Wir gehen daher zur Betrachtung der eigenen Untersuchungen über, welche zunächst vollständige Analysen der winterlichen Abflüsse von 29 verschiedenen Gletschern, ferner von zwei Sommerabflüssen (im ganzen 38 vollständige Analysen), sodann eine Serie summarischer Analysen über Sommerabflüsse der Mehrzahl dieser Gletscher, Proben verschiedener Jahreszeiten, eine Reihe von Spezialuntersuchungen und schließlich eine Auswahl anderwärtiger Gebirgsgewässer in allgemeiner Behandlung umfassen.

Der Verfasser der vorliegenden Abhandlung ist Dr. *Lütschg* für die Anregung zu dieser Arbeit und die stete tatkräftige und moralische Unterstützung während der Ausführung derselben zu größtem Dank verpflichtet.

## B. Untersuchungsmethoden.

### *Probenahme.*

Den Analysenergebnissen schicken wir eine möglichst gedrängte Darstellung der analytischen Methoden voraus, da eine ausführliche Beschreibung den Rahmen dieser Abhandlung überschreiten würde. Immerhin werden wir einige Details näher ausführen, insofern ihre Kenntnis zum Verständnis der Resultate unerlässlich ist.

Die Wasserproben für die Gesamtuntersuchung wurden in Bombonnen von 10 l aus grünem Glas (gegen lösende Einflüsse widerstandsfähiger als weißes Glas) nach Spülung mit dem betreffenden Wasser aufgefangen, nach Ankunft in Bern ein bis mehrere Monate stehen gelassen, so daß selbst sehr feine Trübungen zum Absatz kamen. Für die Analyse selbst wurde das Wasser sehr vorsichtig mittels Heber in große weiße Flaschen mit Glasverschluß übergeführt und sofort bestimmte Volumina abgemessen und zur Eindampfung oder direkten Prüfung bereitgestellt.

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, daß bei fast allen Gletschern gleichzeitig mit der Probefassung sehr genaue Temperaturmessungen speziell des Wassers und der Luft vorgenommen wurden. Sie erfolgten unter der Leitung von Dr. *O. Lütschg* durch die technischen Organe des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft.

### 1. Generelle Bestimmungen.

#### *a) Spezifisches Gewicht (Dichte) bei 15° C.*

Die Dichte wurde mittels Pyknometer bei 15° C ermittelt, bezogen auf destilliertes Wasser von ebenfalls 15° C. Der Fehler beträgt maximal etwa 5 Einheiten der 5. Dezimale.

*b) Suspensierte Stoffe.*

Nach Abhebern des größten Teils des klaren (nur in wenig Fällen noch opalisierenden) Wassers wurde der Rest desselben mit dem Depot in ein Becherglas gegossen und mit destilliertem Wasser nachgespült. Das Unlösliche wurde auf einem tarierten Filter gesammelt, nach dem Trocknen an der Luft gewogen und das Gewicht auf 1 l Wasser umgerechnet.

*c) Trockenrückstand.*

Je 1 l Wasser (200 cm<sup>3</sup> für summarische Analysen), bei 15° C in geprüfem Meßkolben ( $\frac{15^{\circ} \text{E}}{4^{\circ}}$ ) bis zur Marke aufgefüllt, wurde in besonderem, staub- und säurefreiem Raume in Platinschale auf dem Wasserbad eingedampft und hierauf im Trockenschrank bei 180° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

*d) Glührückstand.*

Die Schale mit dem Trockenrückstand wurde vorsichtig über der Bunsenflamme erhitzt, bis eine etwa auftretende Bräunung oder Schwärzung wieder verschwunden war. Der Schaleninhalt wurde hierauf mit kohlenensäuregesättigtem Wasser (bei Anwesenheit von viel Karbonat, zweimal) abgedampft und wiederum bei 180° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

*e) Gesamthärte.*

Die Gesamthärte wurde mit Seifenlösung titriert, indem man letztere mit einer neutralen Calcium- oder Baryumlösung bei verschiedenen Gehalten einstellte und den Härtegrad der Wasserproben je nach dem Verbrauch an Seifenlösung aus der nach obigen Zahlen entworfenen Kurve ableitete. Sie ist in französischen Härtegraden ausgedrückt, also in äquivalenten Gewichtsteilen Calciumcarbonat pro 100 000 Teilen Wasser. Durch Multiplikation mit 10 kann sie leicht in entsprechende mg/l umgerechnet werden.

*f) Alkalität.*

Zur Bestimmung der Alkalität wurden 100 cm<sup>3</sup> Wasser mit 0,1 norm. Salzsäure unter Verwendung von Methylorange bis zur beginnenden Braunrotfärbung titriert. Die hierzu erforderliche Zahl cm<sup>3</sup> mit 5 multipliziert ergab die Alkalität, ebenfalls in französischen Härtegraden. Gesamthärte und Alkalität lassen sich so leicht vergleichen. Die Differenz der beiden Werte mit 1,36 multipliziert gibt ein annäherndes Maß für die vorhandenen Sulfate, als Calciumsulfat ausgedrückt.

*g) Oxydierbarkeit.*

Die «Oxydierbarkeit» stellt ein Maß für anwesende organische Substanzen dar. Man versteht darunter (nach Schweiz. Lebensmittelbuch, Auflage 3 – zur Zeit der Ausführung dieser Analysen in Gebrauch –, S. 165) die Menge Kaliumpermanganat, in mg KMnO<sub>4</sub>/l ausgedrückt, welche unter bestimmten Bedingungen durch das Wasser reduziert werden. Da die Gletscherabflüsse offenbar der Mehrzahl nach fast frei von organischen Substanzen sind und es uns daher darauf ankam, diese Zahlen möglichst frei von Versuchsfehlern vergleichen zu können, haben wir jeweils den Wert des blinden Versuchs vom konventionell bestimmten Wert subtrahiert, was um so nötiger war, da der Betrag für den blinden Versuch ein beträchtlicher ist und in den meisten Fällen einen erheblichen Gehalt an organischen Stoffen vortäuschen würde, wo der Permanganatverbrauch durch das Wasser

selber verschwindend klein ist. Nur in wenig Fällen blieb nach Abzug des blinden Versuchs eine erhebliche Differenz und ging dann gewöhnlich mit einer mehr oder weniger ausgesprochenen Bräunung beim Glühen des Trockenrückstandes parallel, von welcher sonst selten etwas zu bemerken war.

## 2. Bestimmung der anorganischen Einzelbestandteile.

### a) Kationen.

#### Kaliumion.

Das Kaliumion wurde nach der Chloroplatinat-Methode bestimmt. Aus dem Filtrat der Schwefelsäurebestimmung wurde das überschüssige Baryum durch doppelte Fällung mit Ammoniak und Ammoncarbonat, die Ammonsalze durch leichtes Glühen, das Magnesium durch mehrmalige Fällung mittels kleiner Überschüsse von Baryt und letztere wiederum durch tropfenweise Fällung mit Ammoniak und Ammoncarbonat entfernt. Letztere Operationen wurden so oft wiederholt, bis das Gewicht der abgedampften und leicht geblühten Alkalichloride praktisch konstant blieb. Hierauf erfolgte die Trennung des Kaliums vom Natrium durch Fällung mit Platinchlorid, bzw. Extraktion der Doppelsalze mittels 80prozentigem Alkohol usw.

#### Natriumion.

Das Natriumion ergab sich aus den Gesamt-Alkalichloriden, indem das gewogene Kaliumplatinchlorid, in Chlorkalium umgerechnet, davon subtrahiert und die Differenz auf Na umgerechnet wurde.

#### Calciumion

(nebst Kieselsäure, Aluminium und Eisen).

Für die Bestimmung der Kieselsäure, des Aluminiums und des Eisens wurde je 1 l Wasser, genau bei 15° C gemessen, unter Zusatz von 1 cm<sup>3</sup> Salzsäure (d = 1,125), also deutlich sauer, in Platinschale auf dem Wasserbad zur Trockene verdampft, die Kieselsäure durch konzentrierte Salzsäure zur Abscheidung gebracht und in gewohnter Weise bestimmt. Das Filtrat wurde durch einige Tropfen Bromwasser oxydiert und die Sesquioxide durch Ammoniak gefällt. Nach dem Glühen und Wägen derselben wurde das Eisen durch Digestion mit Salzsäure gelöst und kolorimetrisch als Rhodanverbindung bestimmt. Das Gewicht der Sesquioxide, vermindert um die als Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gerechnete Eisenmenge, ergab den Aluminiumgehalt.

Aus dem Filtrat von den Sesquioxiden wurde das Calcium als Oxalat gefällt und durch Titration mit Permanganat ermittelt. Bei hohem Kalkgehalt wurde die Fällung als Oxalat wiederholt.

#### Magnesiumion.

Das Filtrat von Calciumoxalat wurde mit Natriumphosphat und Ammoniak unter den üblichen Vorsichtsmaßregeln versetzt, der entstehende Niederschlag nach dem Glühen als Magnesiumpyrophosphat gewogen.

#### Ammoniumion.

Das Ammoniumion wurde nach der Vorschrift des Schweiz. Lebensmittelbuches (Aufl. 3, S. 166) bestimmt. Da dieser Bestandteil nur in den wenigsten Fällen einen nennenswerten Betrag erreichte und seine Bedeutung mehr auf hygienischem Gebiete liegt, wurde diese Bestimmung bei den letzten Analysen unterlassen.

### b) Anionen.

#### Nitration.

Da dieses Ion nirgends in Mengen von wesentlich mehr als 1 mg/l vorkam, konnte es nur auf kolorimetrischem Wege ermittelt werden. Hierfür kam einerseits die im Lebensmittelbuch angegebene Methode von Grandval und Lajoux (Überführung in Pikrinsäure), andererseits die Diphenylamin-Methode in der Ausführung nach Tillman und Suthoff in Betracht. Wie zu erwarten war, gab letztere Methode öfter etwas höhere Werte. Da die Übereinstimmung immerhin meist befriedigend war, wurde das Mittel beider Werte als maßgebend betrachtet.

#### Chlorion.

Auch dieses Ion ist in den Gletscherabflüssen fast immer nur in Bruchteilen eines mg/l vorhanden. Zu seiner gravimetrischen Bestimmung hätte man also allein schon mehrere Liter eindampfen müssen. Bei der beschränkten zur Verfügung stehenden Materialmenge und dem mit dieser Operation verbundenen Risiko nachträglicher Verunreinigung wurde die direkte vergleichende Schätzung der Trübung durch Silbernitrat unter gleichbleibenden Versuchsbedingungen vorgezogen.

#### Sulfation.

Neben dem Hydrocarbonation spielt in diesen Gewässern fast nur das Sulfation eine beträchtliche Rolle und kann wie bei den Quellwässern der Ebene das erstere an Menge sogar bedeutend übertreffen. Wo es in größerer Menge vorhanden war, wurde es in einer Probe von weniger als 1 l direkt bestimmt. In den meisten Fällen diente 1 l, der in gleicher Weise wie für Calcium- und Magnesiumbestimmung in saurer Lösung abgedampft wurde, für Bestimmung des Sulfations und hierauf zu derjenigen der Alkalien. Das Sulfation wurde in bekannter Weise durch Baryum gefällt.

#### Hydrocarbonation.

Es wäre natürlich von Interesse, die verschiedenen Bindungsstufen der Kohlensäure in den Gletscherwässern kennenzulernen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß das genaue Studium dieser Verhältnisse wertvolle Anhaltspunkte für das Verhältnis von Schmelz- und Quellwasser in den winterlichen Abflüssen geben würde. Jedoch darf man diese Hoffnungen wohl auch nicht zu hoch spannen, weil das Vorhandensein und die Menge der freien und gebundenen Kohlensäure von zu mannigfachen Faktoren bestimmt wird, als daß für oben erwähntes Verhältnis aus diesen Daten ohne weiteres eindeutige Schlüsse gezogen werden könnten.

Da eine große Anzahl der Proben schon vor Beginn der chemischen Arbeiten erhoben werden mußten und auch sonst die Anwesenheit des Chemikers bei den meisten Probefassungen ausgeschlossen war, mußte von einer direkten Bestimmung der Kohlensäure von vornherein Abstand genommen werden. Die in den Analysen unter Hydrocarbonation angegebenen Zahlen sind aus der Alkalität zunächst durch Multiplikation mit 12,2 (100 Teile  $\text{CaCO}_3$  äquivalent 122 Teile  $(\text{HCO}_3)_2$ ) erhalten. Da aber auch die Silikate bei der Alkalitätsbestimmung mittitriert werden, wurden diese Werte in der Weise korrigiert, daß eine der Metakieselsäure äquivalente Menge  $\text{HCO}_3$  in Abzug gebracht wurde.

Im Trockenrückstand finden sich natürlich nicht mehr Bicarbonate, sondern Carbonate, und wenn man denselben mit der Summe der Einzelbestandteile verglichen will,

so muß berücksichtigt werden, daß beim Eintrocknen aus 122 Teilen Hydrocarbonation ( $2\text{HCO}_3$ ) 18 Teile Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und 44 Teile Kohlensäure ( $\text{CO}_2$ ), zusammen 62 Teile abgespalten werden.

#### Hydrophosphation

Auf Hydrophosphation wurde jeweils im Glührückstand von je 1 l mittels Ammonmolybdat geprüft. Es wurden ziemlich oft Spuren dieses Stoffes angetroffen, jedoch nur in einem oder zwei Fällen so viel, daß eine Wägung des Niederschlages in Frage kam. Das Hydrophosphation ist deshalb nur in diesen letzteren Fällen als Fußnote in den Analysentabellen erwähnt.

### C. Analysentabellen.

(Tabellen 3-6)

Dr. h. c. O. *Lütsch* hat bei Anlaß eines Vortrages am Internationalen Kongreß für Geographie in Paris 1931 die hauptsächlichsten Daten der nachstehenden Analysen veröffentlicht. Andererseits enthält sein 1926 erschienenes Spezialwerk «Über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge, Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes» u. a. einige Gesamtanalysen von Gletscherabflüssen dieser Region, welche zu gleicher Zeit und im selben Rahmen mit den vorliegenden Analysen ausgeführt wurden. Wir gestatten uns, die Daten aus dem erwähnten Werk, soweit sie für diese allgemeine Abhandlung von Bedeutung sind, hier wiederzugeben.

Wie der Vortragende in Paris bereits erwähnte, lassen sich die in Untersuchung gezogenen Gletscher nach geologischen Gesichtspunkten in drei Hauptgruppen einteilen, wobei allerdings die Trennung nicht immer mit aller Schärfe zu ziehen ist:

1. Gletscher in rein kristallinen Einzugsgebieten (Aare, Rhone, Albigna);
2. Gletscher mit Kalkzonen im Sammelgebiet (Biferten, Oberer Grindelwald);
3. Gletscher fast ganz im Kalkgebirge (Hüfi).

Wir verweisen in dieser Hinsicht auf die geologische Bearbeitung dieses Stoffes durch die Herren Dr. *F. de Quervain* und Dr. *H. Huber* unter dem Titel: Über einige Zusammenhänge zwischen dem Mineralgehalt von Winterwässern der Gletscher und der Gesteinszusammensetzung.

Für diese Publikation haben wir die Anordnung nach hydrographischem Prinzip gewählt, da sie sich konsequent durchführen läßt und mit der hydrologischen Behandlung parallel geht. Die Gletscher werden nach Flußgebieten eingeteilt und in der Reihenfolge aufgeführt, wie ihre Abflüsse von der Hauptquelle abwärtsschreitend sich mit dem Hauptgewässer vereinigen.

### D. Die Analysenergebnisse.

Wie schon eine oberflächliche Betrachtung der Tabellen zeigt, sind die in Lösung befindlichen Stoffe der winterlichen Gletscherabflüsse zwar im allgemeinen überall dieselben, die in der Volumeneinheit enthaltene Gesamtmenge und das Verhältnis der einzelnen Bestandteile zueinander dagegen weitgehend verschieden, und zwar, wie zu erwarten war, in erster Linie durch die geologische Struktur der Gletscherunterlage bestimmt. Entsprechend der großen Mannigfaltigkeit dieser Struktur weist fast jede Analyse ihre Besonderheiten auf. Immerhin sind diese auch durch eine Reihe anderer Faktoren bedingt.

Wir besprechen die verschiedenen Analysen zunächst einzeln vom rein chemischen Standpunkt aus, um erst später auf ihre Bedeutung in bezug auf die in der Einleitung aufgeworfenen Fragen einzutreten.

### 1. Die Gletscher des Rheingebietes.

#### Analyse 1: *Oberaargletscher.*

Der Oberaargletscher ist ein typischer Vertreter eines Gletschers auf rein kristallinem Untergrund. Sein Wasser enthält nur etwa 40 mg mineralische Bestandteile im Liter, mit wenig Sulfaten, verhältnismäßig viel Kalium.

#### Analyse 2: *Unteraargletscher.*

Dieses Wasser enthält noch weniger gelöste Bestandteile als das vorige. Zugleich sind Härte und Alkalität niedriger, während Alkalien und Sulfation annähernd in gleicher Menge vorhanden sind. Auffallend ist der hohe Kieselsäuregehalt.

#### Analyse 3: *Unteraargletscher.*

##### Sommerwasser.

Während die vorige Probe zur Zeit des niedrigsten Wasserstandes gefaßt wurde, war in diesem Fall die Abschmelzung in vollem Gang. Der Trocken- und Glührückstand ist daher hier noch beträchtlich niedriger, während die Menge der suspendierten Stoffe das Siebenfache der in Lösung befindlichen ausmacht. Das Wasser wies auch nach monatelangem Stehen eine opalisierende Trübung auf. Die außergewöhnlich hohen Zahlen für Eisen und Aluminium deuten darauf hin, daß diese äußerst feine Trübung wahrscheinlich aus einer Art eisenreichem Ton bestand. Diese beiden Metalle sind also vermutlich nicht als in Ionenform vorhanden anzunehmen. Gegenüber der vorigen Analyse ist das Sulfation stärker, die Kieselsäure schwächer reduziert als die Menge der Gesamtbestandteile.

#### Analyse 4: *Gauligletscher.*

Das Wasser dieses Gletschers ist demjenigen des Unteraargletschers (Analyse 2) sehr ähnlich, wobei aber Kalium und Kieselsäure zurücktreten, während Calcium und Kohlensäure leicht vermehrt sind.

#### Analyse 5: *Trittgletscher.*

Bezüglich der Alkalien schließt sich diese Analyse an die vorige an. Dagegen finden wir die Kalksalze beträchtlich in Zunahme, die Kieselsäure vermindert.

#### Analysen 6 und 7: *Rosenlauigletscher.*

Während bei den vorstehenden Gletschern der Untergrund fast ausschließlich aus kristallinen Gesteinen bestand, begegnen wir hier zum erstenmal mächtigen Kalkzonen im Einzugsgebiet.

Bei Vergleich der zwei Analysen ist zu beachten, daß die erste Wasser direkt beim Austritt aus dem rechten Gletscherarm betrifft. Das zweite Wasser ist an einer Stelle gefaßt, wo die Abflüsse beider Gletscherzungen vereinigt sind, wo sich aber vielleicht auch schon Quellwasser aus der Moräne beigemischt hat. Es ist auffallend reich an Calcium und Kohlensäure, anderseits arm an Kalium. Die Alkalität ist die höchste bei unseren Untersuchungen von Gletscherabflüssen beobachtete.

Analysen 8, 9 und 10: *Oberer Grindelwaldgletscher.*

Rosenlaur-, Oberer und Unterer Grindelwaldgletscher bilden eine naturgegebene Vergleichsreihe. In der Tat läßt sich in mehr als einer Beziehung eine fortschreitende Abstufung feststellen. Dieselbe ist allerdings am ausgesprochensten beim Sulfation und damit im Zusammenhang beim Calcium und Magnesium. Aber auch beim Kalium und bei der Kieselsäure ist sie wenigstens angedeutet.

Die beiden ersten Analysen vom Oberen Grindelwaldgletscher weisen, entsprechend der fast gleichzeitigen Fassung an zwei sehr wenig entfernten Stellen, nur sehr geringfügige Unterschiede auf, die zum großen Teil innerhalb der unvermeidlichen Fehlergrenzen liegen. Besondere Beachtung verdient die dritte Analyse, nämlich das im August gefaßte

Sommerwasser.

Wie beim Unteraargletscher finden wir im Sommerwasser einen stark verminderten Gehalt an gelösten Stoffen. Die Verdünnung (am Glührückstand gemessen) ist hier aber bedeutend stärker und beträgt 3,8 (im Vergleich zu 1,7 beim Unteraargletscher). Übereinstimmend mit jenem analogen Fall ist die Verdünnung ungleich für verschiedene Bestandteile.

Analyse 11: *Unterer Grindelwaldgletscher.*

Wie schon unter Analysen 8 und 9 bemerkt, nimmt vom Rosenlaur- zum Unteren Grindelwaldgletscher insbesondere der Sulfatgehalt zu. Bemerkenswert ist noch, daß die relative Zunahme beim Magnesium etwas stärker ist als beim Calcium.

Analyse 12: *Kanderfirn-Alpelligletscher.*

Das Wasser dieses Gletschers ist ausgesprochen gipsreich, wobei auch Magnesiumsulfat stark vertreten ist. Vergleicht man diese Analyse mit den vorhergehenden, so ist man sehr versucht, die Analogie über die Grindelwaldgletscher hinaus noch auf diesen Gletscher auszudehnen.

Analyse 13: *Lötschenberggletscher.*

So benachbart dieser Gletscher dem vorigen ist, so scheint in der geologischen Unterlage doch ein beträchtlicher Unterschied zu bestehen, insofern die Sulfate hier plötzlich auf ein Minimum reduziert sind. Der relativ hohe Magnesiumgehalt unterscheidet dieses Wasser hauptsächlich von demjenigen des Rosenlaurgletschers.

Analyse 14: *Hüfigletscher.*

Diese Analyse scheint auf den ersten Blick der vorigen sehr ähnlich zu sein. Bei genauerem Zusehen ergeben sich aber nicht ganz unwichtige Unterschiede. Einmal sind sowohl Alkalien als Kieselsäure niedriger. Andererseits ist mehr Sulfation vorhanden, bei etwas vermindertem Hydrocarbonation.

Analyse 15: *Bifertengletscher.*

Der Biferten- wie der Hüfigletscher sind gewissermaßen an das Tödimassiv angelehnt. Es ist daher nicht verwunderlich, daß ihre Gewässer große Analogie zeigen. Wie es kommt, daß das Wasser beim Bifertengletscher bei fast gleichem Calcium- und Sulfatgehalt mehr als doppelt soviel Magnesium enthält, findet seine Erklärung wohl in besonderen stratigraphisch-chemischen Verhältnissen. Auffallend hoch ist auch der Kieselsäuregehalt.

## 2. Die Gletscher des Rhonegebietes.

### Analyse 16: *Rhonegletscher.*

Die Unterlage des Rhonegletschers ist wieder ausgesprochen kristallin. Man kann daher bei ihm ähnliche Verhältnisse auch in bezug auf die chemische Zusammensetzung des Wassers erwarten wie bei der Reihe Oberaar-/Triftgletscher. Eigenartig ist das Überwiegen der Alkalität über die Gesamthärte.

### Analyse 17: *Fieschergletscher.*

Auch dieses Wasser ist demjenigen der Aargletscher sehr ähnlich, zwischen welchen es mehr oder weniger eine Zwischenstellung einnimmt.

### Analyse 18: *Aletschgletscher.*

Verglichen mit der vorigen Analyse, treffen wir hier fast nur Calciumcarbonat und Calciumsulfat vermehrt. Da der Magnesiumgehalt auf gleicher Höhe ist, kann man mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit schließen, daß dieser Sulfatgehalt eher einer intensiven Berührung des Wassers mit Gesteinsmaterial überhaupt, als dem Vorhandensein von triasischen Schichten zuzuschreiben sei.

### Analyse 19: *Gornergletscher.*

Wohl nicht ganz von ungefähr dürfte hier auf den größten Gletscher der Schweiz der gewöhnlich als zweitgrößter bezeichnete folgen und damit zu einem Vergleich einladen. Die geographische Lage ist zwar recht verschieden, aber in mancher Hinsicht doch auch analog.

Dieses Wasser enthält fast doppelt soviel gelöste Stoffe als dasjenige des Aletschgletschers, und der Reichtum an solchen kann vielleicht zum Teil demselben Umstand zugeschrieben werden wie bei diesem. Die so beträchtliche Vermehrung des Mineralstoffgehaltes läßt sich aber hierdurch allein nicht erklären; vielmehr deutet der hohe Magnesiumgehalt zugleich auf Anwesenheit triasischer Schichten im Untergrund des Gletschers. Es muß hier aber vorweggenommen werden, daß der hohe Gehalt an gelösten Stoffen offenbar hauptsächlich dem Zufluß des Furggbaches zuzuschreiben ist. Wir werden bei der Besprechung der Sommerwässer sehen, daß letzterer selbst zur Zeit der intensiven Gletscherschmelze einen hohen Härtegrad aufweist.

### Analyse 20: *Z'Muttgletscher.*

Das Wasser des Z'Muttgletschers unterscheidet sich nicht nur durch einen verminderten Mineralstoffgehalt von demjenigen des Gornergletschers. Der auffallendste Unterschied besteht darin, daß hier das Natrium das Kalium an Menge übertrifft.

### Analysen 21 und 22: *Findelengletscher.*

#### a) direkt am Gletscher.

Obwohl diese Analyse sich nur sehr wenig von der folgenden unterscheidet, führen wir doch beide an als Beispiel für Unterschiede, die sich durch etwas verschiedene Probenfassung ergeben können.

Zunächst fällt bei dieser Analyse der sehr hohe Gehalt an Sulfaten auf, welcher dem Wasser einen Mineralstoffgehalt erteilt, der denjenigen aller hier untersuchten Gewässer weit übertrifft. Immerhin muß gesagt werden, daß damit das Maximum an Erdalkalisulfaten und Mineralstoffen, wie sie in Quellwässern vorkommen (ohne von den eigentlichen Solen zu reden), keineswegs erreicht wird. Die Löslichkeit des Calciumsulfates in reinem Wasser ist etwa 1 : 400, also 2500 mg/l Quellen mit 1000 bis 1500 mg Calciumsulfat sind in manchen Gegenden gar nicht selten.

Neben dem Calcium wurden in diesem Wasser auch kleine Mengen von Strontium gefunden und ausnahmsweise bestimmt. Sehr stark ist das Magnesium vertreten. Die Alkalien sind gegenüber anderen Fällen nur wenig vermehrt und entsprechen ungefähr dem ebenfalls ziemlich hohen Kieselsäuregehalt. Bemerkenswert ist der für Gletscherabflüsse maximale Chlorgehalt, während andererseits das Nitration durchaus nicht von den gewöhnlichen Werten abweicht.

Es verdient hervorgehoben zu werden, daß dieses Wasser bei der Probenahme leicht getrübt war, während das folgende in klarem Zustand gefaßt wurde. Die Probenahme erfolgte eben aus diesem Grunde doppelt, um festzustellen, inwiefern mit der Trübung auch eine sonstige Verschiedenheit der Zusammensetzung verbunden sei.

b) etwa 5 m vom Gletscher entfernt.

Man könnte leicht glauben, daß die leichte Trübung der vorigen Probe durch Hinzutreten von Schmelzwasser bedingt sei und diese klare Probe reineres Quellwasser darstelle. Die Analyse zeigt aber eher das Gegenteil. Die Unterschiede sind sehr gering; aber gerade die für Quellwasser typischen Sulfate erscheinen hier eher vermindert. Man sieht, daß kleine Unterschiede nach Ort und Zeit der Probefassung in der Analyse zwar bemerkbar sein können, den Charakter des Wassers aber nicht wesentlich anders erscheinen lassen.

Analysen 23 und 24: *Schwarzenberggletscher*.

a) Südrand der Gletscherzunge, 10 m östlich des Gletschertores.

Abgesehen vom Sulfatgehalt, läßt sich dieses Wasser am ehesten demjenigen des Findelengletschers an die Seite stellen. Es ist ziemlich reich an Alkalien und Kieselsäure sowie an Magnesium. Auffallend ist aber vor allem der ganz ungewöhnlich hohe Betrag an suspendierten Stoffen. Obschon die Trübung lange nicht immer so außerordentlich stark ist, scheint sie doch gewissermaßen eine Eigentümlichkeit des Schwarzenberggletschers zu sein. Wie aus den jahreszeitlichen Untersuchungen<sup>1)</sup> hervorgeht, ist sein Abfluß fast das ganze Jahr hindurch mehr oder weniger getrübt. Eine leichte Opaleszenz blieb auch nach mehrwöchentlichem Stehen des Wassers bestehen und bedingte ohne Zweifel die hohen, für Eisen und Aluminium gefundenen Zahlen.

b) am Gletschertor.

Obschon nur acht Tage später gefaßt, unterscheidet sich dieses Wassers, abgesehen von seinem stark verminderten Gehalt an suspendierten Stoffen, durch einen nur halb so großen Trocken- und Glührückstand vom vorigen. Eisen und Aluminium sind fast gleich hoch, aber wahrscheinlich nicht eigentlich in Lösung. Nitration, Chlor und Kieselsäure sind ebenfalls fast unverändert. Am meisten reduziert ist das Sulfation.

<sup>1)</sup> Siehe O. Lütshg: Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge. 1926. S. 256.

Analysen 25, 26 und 27: *Feeegletscher*.

a) 5 m vom Gletschertor der südlichen Zunge.

Dieses Wasser ist sehr mineralstoffarm. Es läßt sich aber kaum einem der früher besprochenen aus kristallinem Gestein an die Seite stellen, da es wenig Alkalien, sehr wenig Sulfation und namentlich außerordentlich wenig Kieselsäure enthält. Dabei ist der Gehalt an Nitration verhältnismäßig hoch.

b) Wasserader am östlichen Rande der nördlichen Zunge des Feeegletschers.

Der Unterschied gegenüber der vorigen Analyse ist sehr beträchtlich. Wir haben hier ein Wasser mit ziemlich hohem Sulfatgehalt, das gleichzeitig, wie dasjenige vom Schwarzenberggletscher, einen relativ starken Kaligehalt aufweist.

c) Feevisp,

unterhalb der Vereinigung sämtlicher Abflüsse des Feeegletschers,  
jedoch oberhalb des Zuflusses vom Fall- und Hohbalengletscher.

Die Zahlen für dieses Gewässer stellen im allgemeinen Mittelwerte zwischen a und b, mit etwas größerer Beteiligung von b, dar. Gegenüber beiden Komponenten vermehrt sind die Alkalität und die Kieselsäure. Als Ganzes betrachtet besteht eine große Ähnlichkeit dieser Analyse mit der ersten Analyse (Nr. 23) vom Schwarzenberggletscher, was in Anbetracht der analogen Lage nicht zu verwundern ist.

Analyse 28: *Lang-* inkl. *Jäbigletscher*.

Mit dieser Analyse kehren wir vorübergehend wieder zum Aarmassiv zurück. Obschon die Lage nicht in jeder Beziehung derjenigen des Aletschgletschers entspricht und die Dimensionen sehr verschieden sind, ist die Übereinstimmung der Analysen auffallend groß und fast nur ein Plus an Calciumcarbonat bei diesem Gletscher festzustellen.

Analyse 29: *Turtmannletscher*.

Seiner Lage entsprechend wäre dieser Gletscher am ehesten mit dem Z'Muttgletscher zu vergleichen, und wir finden auch bei beiden ungefähr gleichviel Mineralstoffe in Lösung. Daß aber nicht unbeträchtliche geologische Unterschiede bestehen, äußert sich schon bei den beiden Härtewerten. Der Unterschied zugunsten des Turtmannletschers scheint in einem Plus an Magnesiumcarbonat begründet zu sein, an dessen Stelle beim Z'Muttgletscher die Alkalisulfate treten.

Analyse 30: *Arollagletscher*.

Das Wasser des Arollagletschers gleicht demjenigen des Aletschgletschers in bezug auf Gesamtmineralstoffe und Hauptbestandteile. Wir finden aber auch nicht unwesentliche Unterschiede. Zunächst ist das Verhältnis der Alkalien umgekehrt; sodann ist Arolla reicher an Magnesium. Auffallend hoch ist der Kieselsäuregehalt.

Analyse 31: *Glacier de Ferpècle*.

Hier finden wir wieder Verhältnisse, die stark an den Z'Muttgletscher erinnern. Auch dieses Wasser scheint verhältnismäßig viel Alkalisulfate zu enthalten, wobei das Natrium vorwiegt. Nitrate und Kieselsäure sind wie beim vorigen relativ hoch.

Analyse 32: *Glacier de Corbassière.*

Im Gegensatz zu den zwei vorigen Analysen schließt sich diese wieder mehr an diejenige des Turtmanngletschers an, mit dem Unterschied, daß einerseits die Alkalien, andererseits besonders das Magnesium vermehrt sind. Von Z'Mutt und Ferpècle unterscheidet sich Corbassière hauptsächlich durch verminderten Sulfatgehalt. Es nähert sich in gewisser Beziehung dem Biferten, enthält aber mehr Alkalien.

**3. Die Gletscher des Addagebietes.**

Analyse 33: *Fornogletscher.*

Da dieses Wasser in bezug auf beide Härtegrade sehr nahe mit demjenigen des Oberaargletschers übereinstimmt, bezüglich Gesamtmineralstoffgehalt aber deutlich niedriger ist, erscheint der Vergleich der Einzelbestandteile von nicht geringem Interesse.

Die Summe der Alkalien ist fast gleich; jedoch finden wir beim Forno weniger Kali und mehr Natrium als beim Oberaar. Ein Hauptunterschied liegt beim Calcium, welches Kation beim Oberaargletscher stärker vertreten ist als beim Fornogletscher. Da ein ähnlicher Unterschied beim Sulfation zu bemerken ist, scheint die Folgerung berechtigt, daß der Untergrund beim Oberaargletscher gewisse Mengen Calciumsulfat enthält, die beim Fornogletscher fast ganz fehlen. Bei letzterem finden wir dafür mehr Magnesium, das aber aus Silikaten zu stammen scheint. Auffallend hoch ist der Nitratgehalt.

Analyse 34: *Albignagletscher.*

Ganz eigenartige Verhältnisse finden wir bei diesem Gletscher. Das Wasser gab mit Phenolphthalein eine deutliche Rötung, und die Alkalität ist fast 1 Grad höher als die Gesamthärte. Sie ist demnach eher durch Alkalicarbonate als durch Erdalkalibarbonate bedingt. In der Tat enthält das Wasser außerordentlich viel Kalium neben nicht übermäßig viel Natrium. Der Calciumgehalt kann unter diesen Umständen nicht hoch sein und ist der niedrigste bei Winterabflüssen beobachtete. Auffallend ist das gänzliche Fehlen des Nitrations, das beim Fornogletscher besonders hoch war. An Sulfation ist der Albigna wie der Forno sehr arm. Der Gehalt an Kieselsäure wiederum ist ziemlich normal. Der hohe Gehalt an reduzierenden Substanzen dürfte wohl mit der alkalischen Reaktion im Zusammenhang stehen, insofern dieselbe die Lösung von Huminstoffen befördert. Nicht unerwähnt soll bleiben, daß beim Glühen des Trockenrückstandes starke Schwärzung eintrat und daß die Reaktion auf Phosphorsäure in diesem Fall deutlicher als sonst war.

**4. Die Gletscher des Inngebietes.**

Analyse 35: *Fexgletscher.*

Der Fexgletscher scheint, im Gegensatz zu den vier andern in Betracht gezogenen Gletschern des Berninagebietes im weiteren Sinne, wieder beträchtliche sedimentäre Elemente in seinem Untergrund zu besitzen. Die Zusammensetzung seines Wassers schließt sich durchaus derjenigen der Gletscher mit kalkhaltiger Unterlage an. Die Ähnlichkeit ist besonders auffallend beim Turtmanngletscher. Ob dies eine zufällige Übereinstimmung ist, oder ob in der geologischen Struktur bei beiden Gletschern eine weitgehende Analogie besteht, muß dem Urteil der Geologen überlassen werden.

Analyse 36: *Cambrenagletscher*.

Das Wasser des Cambrenagletschers kann allenfalls wieder mit demjenigen des Oberaargletscher verglichen werden. Es bestehen aber einige ziemlich wichtige Unterschiede. Cambrena enthält weniger Alkalien, und das Verhältnis zwischen Kalium und Natrium ist umgekehrt als beim Oberaar. Ferner haben wir hier mehr Magnesium und Sulfation.

Analysen 37 und 38: *Morteratschgletscher*.

a) 21. April 1920, 9 Uhr 45.

Abgesehen von den Alkalien, schließt sich diese Analyse ziemlich eng an die vorhergehende an. Der Hauptunterschied besteht in einem Plus bei den Alkalien und einem Minus beim Magnesium und bei der Kohlensäure, welche letztere durch Sulfation und Kieselsäure ersetzt scheint.

b) 25. April 1920, 14 Uhr 30.

Gegenüber a) ist dieses Wasser beträchtlich ärmer an gelösten Mineralstoffen. Ob schon die Lufttemperatur im Moment der Fassung bedeutend unter dem Nullpunkt lag, darf angenommen werden, daß während der vier dazwischenliegenden Tage der Schmelzprozeß wenigstens bezüglich Schneedecke bereits begonnen habe, so daß hier ein typischer Fall der Beimischung von Schmelzwasser vorläge, worauf wir später noch zurückzukommen gedenken. Es sei hier nur noch auf das leichte Überwiegen der Alkalität über die Gesamthärte aufmerksam gemacht, dem wir beim Sommerwasser des Unteraargletschers und beim Rhonegletscher bereits begegnet sind.

5. Anhang.

Als Vergleichsmaterial führen wir noch zwei Analysen aus dem schon zitierten Werke von O. Lütischg: «Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge» an, welche zwar nicht typische Gletscherabflüsse betreffen, aber einerseits einen extremen Fall, andererseits eine Art Mittelwert eines ganzen Gletschergebietes darstellen, wobei allerdings gerade ein einziger Quellbach sich ziemlich stark bemerkbar macht.

Analyse 39: *Ofentalbach*.

Das Wasser wurde nicht direkt am Ofentalgletscher, sondern etwa 3 km unterhalb, kurz vor der Mündung in die Saaser Visp, gefaßt. Trotzdem enthält es außergewöhnlich wenig gelöste Stoffe. Der Trockenrückstand beträgt knapp 13 mg, und selbst die Gesamthärte erreicht nicht einmal 1 Grad. Natürlich sind auch alle Einzelbestandteile auf ein Minimum reduziert, was besonders beim Calcium mit 1,8 mg drastisch zum Ausdruck kommt. Demgegenüber erscheint der Eisen- und Aluminiumgehalt verhältnismäßig hoch und ebenso die Kieselsäure.

Analyse 40: *Saaser Visp* (unterhalb des Allalingletschers).

Zum Verständnis dieser Analyse ist zu berücksichtigen, daß als Komponenten dieses Wassers zunächst die Abflüsse des Thäliboden- und Sewinen-, dann des Ofentalgletschers in Betracht kommen. Sodann folgt der mächtige Schwarzenberggletscher, dessen Wasser die Visp noch vor dem Mattmarksee, sofern von einem solchen die Rede sein kann, erreicht. In der See-Ebene mündet nun ferner der Kästenbach, der gegenüber den bisher

erwähnten Zuflüssen eine Sonderstellung einnimmt. Aus stark triashaltigen Gesteinsschichten in seinem Quellgebiet bringt dieser Bach beträchtliche Sulfatmengen nach der Mattmarkebene und in die Saaser Visp, wie aus folgenden summarischen Angaben über die Zusammensetzung des Wassers am 22. März 1920 hervorgeht, die wir dem oben erwähnten Werk (S. 256) entnehmen:

Trockenrückstand	301,6 mg/l
Glührückstand	292,8 mg/l
Gesamthärte	21,6 franz. Härtegrade
Alkalität	4,8 franz. Härtegrade

Nach Einfluß dieses Baches kommt noch der Abfluß des Allalngletschers hinzu. Man kann also annehmen, daß Analyse 40 die Abflüsse des engeren Mattmarkgebietes mit Einschluß des Allalngletschers umfaßt.

Seiner Zusammensetzung nach läßt sich dieses Wassers am ehesten mit dem Abfluß des Unteren Grindelwaldgletschers vergleichen, wobei allerdings die Kalksalze wesentlich zurücktreten, das Magnesium etwas vermehrt ist.

#### **E. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Zusammensetzung des Wassers bei Gletscherabflüssen.**

Leider besitzen wir nur sehr wenig systematische, über das ganze Jahr sich erstreckende Untersuchungen des Wassers von eigentlichen Gletscherabflüssen. Zwar enthält das Werk über das Mattmarkgebiet eine Reihe von fortgesetzten Untersuchungen an Gewässern des genannten Gebietes, die sich zum Teil über mehr als ein Jahr erstrecken. Es sind aber nur ganz wenig direkte Gletscherabflüsse. Dabei umfaßt die Reihe des Schwarzenberggletschers nur die Monate August bis Mai. (Wir ergänzen sie noch durch die zwei in der Einleitung erwähnten Analysen von Prof. Dr. *Mellet* in Lausanne, wenigstens in bezug auf Glührückstand.) Andererseits sind die Schwankungen beim Ofentalbach, der zwar nach anderen Untersuchungen mit dem Abfluß des Ofentalgletschers fast gleichgestellt werden kann, bei dem sehr geringen Mineralstoffgehalt äußerst geringfügig. Der Vollständigkeit halber geben wir die in Betracht kommenden Angaben in nachstehender Tabelle 7 wieder.

Beim *Ofentalbach* sind, wie schon erwähnt, die Schwankungen sehr gering. Bemerkenswert ist immerhin, daß das Maximum an gelösten Stoffen der allgemeinen Regel entsprechend im März zu finden ist, während die Alkalität im Sommer zunächst noch ansteigt bei gleichzeitig minimaler Gesamthärte. Das eigentliche Minimum der gelösten Bestandteile fällt auf September.

Beim Abfluß des *Schwarzenberggletschers* haben wir ziemlich eigenartige Verhältnisse. Es ist leicht erklärlich, daß Wasserproben vom August wie vom September ein Minimum an gelösten Stoffen aufweisen können und dabei gleichzeitig viel suspendierte Stoffe enthalten. Auch das sekundäre Maximum des Trocken- und Glührückstandes im November könnte in einer Trockenperiode begründet sein. Besonders auffallend ist aber der hohe Betrag an suspendierten Stoffen der Märzprobe, der übrigens, wie wir bei den Gesamtanalysen gesehen haben, bei der fast gleichzeitigen Probenahme für die Hauptanalyse noch weit übertroffen wurde. Da die gelösten Stoffe dort wie hier im Maximum sind, ist kaum anzunehmen, daß es sich um plötzlichen Zufluß von Schmelzwasser handle, sondern eher, daß loses Terrain infolge Auswaschung der Sulfate vom durchfließenden Wasser mitgerissen wird. Nicht ohne weiteres erklärlich ist ferner der Umstand, daß die

Maiprobe bei fast gleichem Glührückstand viel höhere Härtegrade zeigt als die August- und Septemberproben. Die Augustprobe des Jahres 1916 zeigt ein etwas ausgesprochenes Minimum, als es bei den Probenahmen des Jahres 1921 erkennbar war.

**Ofentalbach**  
Felschlucht vor der Mündung  
in die Saaser Visp

**Abfluß des**  
**Schwarzenberggletschers**  
zunächst unterhalb des Gletschers

Tabelle 7

	Trocken- Rück- stand mg/l	Glüh- Rück- stand mg/l	Gesamt- härte Franz. Härte- grade	Alka- lität Franz. Härte- grade	Susp. Stoffe mg/l	Trocken- Rück- stand mg/l	Glüh- Rück- stand mg/l	Gesamt- härte Franz. Härte- grade	Alka- lität Franz. Härte- grade
November 1919	12	10	0,4	0,6	-	-	-	-	-
März 1920	13	11	0,8	0,7	-	-	-	-	-
April 1920	8	7	0,4	0,8	-	-	12. IV. 1916 98,4	-	-
Juni 1920	11	10	0,2	0,8	-	-	-	-	-
August 1920	7	6	0,2	0,9	985	55	54	2,3	2,6
September 1920	5	4	0,3	0,5	460	58	57	2,0	1,9
November 1920	10	9	0,3	0,5	36	82	82	5,8	4,8
Januar 1921	9	8	0,5	0,7	7 4	63 60	58 55	4,3 4,5	3,3 3,2
März 1921	12	11	0,6	0,8	348	97	92	7,5	5,2
Mai 1921	-	9	0,4	0,6	88	-	56	4,9	3,8

Vom *Oberen Grindelwaldgletscher* haben wir, wenn auch nicht systematisch fortgesetzte, so doch ziemlich zahlreiche Untersuchungen, die sich fast auf alle Jahreszeiten erstrecken. Wir führen sie hier in jahreszeitlicher Anordnung an, obschon sie sich auf mehrere Jahre verteilen und das so resultierende Bild für die jahreszeitlichen Schwankungen nicht ganz einwandfrei sein wird. Auch die Ergebnisse der in der Einleitung angeführten Analysen von Prof. Dr. *Mellet* der Jahre 1916 und 1918 lassen sich, wenigstens bezüglich Glührückstand, hier einfügen.

**Oberer Grindelwaldgletscher.**  
Jahreszeiten.

Tabelle 8

Jahr	Monat	Tag	Stunde	Susp.	Trocken-	Glüh-	Gesamt-	Alkalität
				Stoffe	Rückstand	Rückstand	Härte	Alkalität
				mg/l	mg/l	mg/l	Franz. Härtegrade	Franz. Härtegrade
1921	Januar	27.	17.20	—	98,5	95,5	6,6	6,0
		29.	17.20	—	89,5	88	6,3	5,3
1916	Februar	6.	13.50	—	—	101	—	—
1920	Februar	16.	12.40	16	105,6	103,2	8,5	7,2
1921	März	17.	9.10	—	107	107	8,6	7,3
	Mai	15.	17.10	1032	55,5	55	4,6	4,65
		17.	9.15	217	49	46	4,2	4,0
1918	Mai	24.	11.00	—	—	57,2	—	—
1919	Juni	24.	7.20	47	68	63	—	5,8
			18.30	—	78	72	—	5,9
1920	August	10.	—	104	27,4	27,1	2,2	2,15
	September	14.	12.30	32	34	33	2,4	2,6
		15.	12.00	26	33	33	2,7	2,6
	Dezember	1.	11.45	—	77	76	6,1	5,4
		14.00	—	73,5	67	5,4	4,5	

Wie bei den Mattmarkgewässern treffen wir ein Maximum an gelösten Stoffen im Februar bis März. Im Mai findet sich ein sekundäres Minimum, das der Schneeschmelze zuzuschreiben ist, während im Juni ein gewisser Stillstand eintritt, dem die eigentliche Gletscherschmelze erst im Juli und August folgt. Die Verminderung der gelösten Stoffe hält aber noch im September fast unvermindert an, und die Anreicherung erfolgt nur ganz langsam, um erst im Februar und März wieder den Höchstbetrag zu erreichen.

Weit weniger zahlreiche Daten stehen uns für den *Rhonegletscher* zur Verfügung. Wir geben sie ebenfalls nach Jahreszeiten angeordnet wieder.

**Rhonegletscher.**  
Jahreszeiten.

Tabelle 9

Nr.	Jahr	Monat	Tag	Stunde	Susp.	Trocken-	Glüh-	Gesamt-	Alka-
					Stoffe	Rückstand	Rückstand	Härte	lität
					mg/l	mg/l	mg/l	Franz. Härtegrade	Franz. Härtegrade
1.	1920	März	1.	—	21	42,5	42,65	3,0	3,2
2.	1919	April	15.	10	2	74	72	—	4,2
3.	1920	Mai	27.	—	—	—	—	0,6	1,1
4.	1920	Mai	27.	—	—	—	—	1,5	1,9
5.	1921	Juni	12.	9.30	312	24	24	0,8	1,2
6.	1920	Oktober	29.	11	35	18	18	0,4	0,75

2. etwa 400 m vom Gletschertor  
3. 30 m vom Gletschertor

4. Rhone bei Gletsch  
5. und 6. beim Gletschertor

Zu diesen Zahlen ist zunächst zu bemerken, daß in der Wasserprobe Nr. 2 wahrscheinlich Wasser des Muttbaches (Abfluß des Gratschluchtgletschers) enthalten war, der ganz in der Nähe des Gletschertores schon in den eigentlichen Abfluß des Rhonegletschers (Rhone) mündet. Es wäre sonst kaum verständlich, daß die Gesamtheit der gelösten Bestandteile Mitte April soviel höher wäre als am 1. März, da gewöhnlich im April bereits eine leichte Erhöhung der Wasserführung, jedenfalls aber keine wesentliche Verminderung eintritt. Die Ergebnisse für Nr. 2 werden sofort erklärlich, wenn wir die Resultate für den Muttbach angeben, welche am 27. Mai 1920, also gleichzeitig mit Nrn. 3 und 4, erhalten wurden, nämlich:

$$\begin{aligned} \text{Gesamthärte} &= 4,75 \text{ franz. Härtegrade} \\ \text{Alkalität} &= 3,9 \text{ franz. Härtegrade} \end{aligned}$$

Eine weitere, etwas auffällige Erscheinung in obiger Tabelle ist das allgemeine Überwiegen der Alkalität über die Gesamthärte. Zwar begegnen wir dieser Tatsache bei den Gletscherabflüssen auch sonst noch ziemlich häufig, jedoch meist auf die Sommermonate beschränkt. Vielleicht liegt der Grund hier vornehmlich in der chemischen Natur des Gesteins in dieser Gegend. Dafür spricht der Befund für die beiden Härtegrade an einer warmen Quelle in Gletsch (hinter dem Hotel), ebenfalls am 27. Mai 1920:

$$\begin{aligned} \text{Gesamthärte} &= 0,5 \text{ franz. Härtegrade} \\ \text{Alkalität} &= 2,1 \text{ franz. Härtegrade} \end{aligned}$$

Bezüglich der jahreszeitlichen Schwankungen läßt obige Tabelle bei der beschränkten Zahl von Probenahmen, besonders für die Wintermonate, keine weitgehenden Schlüsse zu. Sie bestätigt nur im allgemeinen das Maximum der gelösten Stoffe im Frühjahr und das Minimum gegen Herbst.

In diesem Zusammenhang und im Anschluß an die Gesamtanalyse Nr. 40 fügen wir noch eine Untersuchungsreihe an, welche zwar nicht einen speziellen Gletscherabfluß betrifft, sondern ein Gewässer, das den Abfluß eines ganzen, stark vergletscherten Gebietes, allerdings mit Einschluß eines größeren und einiger kleineren Quellbäche, darstellt. Es handelt sich um das Wasser der Saaser Visp beim Austritt aus dem Allalíngletscher. Die Reihe hat einerseits den Vorteil möglicher Regelmäßigkeit und Vollständigkeit, andererseits wird ihr Wert erhöht durch die Möglichkeit des Vergleiches mit der Gesamtanalyse (Nr. 40). Sie ist, wie diese, dem bereits erwähnten Spezialwerk über das Mattmarkgebiet entnommen (S. 259).

#### *Saaser Visp, Mattmark unterhalb des Allalíngletschers.*

Bemerkenswert an diesen Ergebnissen sind die hohen Zahlen und andererseits deren starke Schwankungen im Mineralstoffgehalt überhaupt und bei der Gesamthärte, welche von den Sulfatzufuhren durch den Kästenbach herrühren. Die auffallende Erhöhung der Alkalität Ende April 1920 ist wahrscheinlich dem Umstande zuzuschreiben, daß die Schneeschmelze beträchtliche Mengen organischer Stoffe aus den oberflächlichen Bodenschichten mit fortführte. Tatsächlich enthielt dieses Wasser ungewöhnlich viel organische Stoffe und wies einen deutlichen Geruch nach Schwefelwasserstoff auf. Das Maximum der gelösten Stoffe im März 1921 ist viel ausgesprochener als im Jahre 1920, wo es die Werte vom November 1919 kaum übertrifft. Das Minimum an gelösten Stoffen, gemessen an Trocken- und Glührückstand, ist im September, während Gesamthärte und Alkalität ihre tiefsten Werte im Juni und August erreichen, etwa zugleich mit dem Maximum der Wasserführung. Die Menge der suspendierten Stoffe erscheint ziemlich unregelmäßig und

nicht in direktem Zusammenhang mit der Wasserführung. Wahrscheinlich spielen die eigenartigen Verhältnisse beim Schwarzenberggletscher dabei eine bestimmende Rolle.

**Saaser Visp**  
Mattmark unterhalb des Allalingletschers

Tabelle 10

Jahr	Monat	Tag	Stunde	Susp. Stoffe mg/l	Trocken- Rück- stand mg/l	Glüh- Rück- stand mg/l	Gesamt- Härte Franz. Härtegr.	Alkali- tät Franz. Härtegr.	
1919	November	8.	15.00	236	127	125	10,0	4,2	
1920	März	23.	16.35	48	129	124	10,2	4,3	1)
	April	29.	—	trüb	99	78	6,5	7,3	2)
	Juni	28.	—	trüb	47	47	2,4	2,1	
	August	9.	12.25	200	48	47	2,3	2,0	3)
	September	10.	14.08	258	39	38	2,9	2,1	4)
	November	16.	17.30	0	113	112	8,9	3,9	
1921	Januar	10.	16.10	36	159	153	11,6	4,2	
	März	9.	15.45	27	175	166	12,8	4,3	5)
	Mai	7.	13.20	479	—	101	8,4	4,8	

1) Temperatur: Wasser 1,4°, Luft 3,0°

2) Geruch nach Schwefelwasserstoff

3) Temperatur: Wasser 8,2°

4) Temperatur: Wasser 6,8°, Luft 9,4°

5) Temperatur: Wasser 1,0°, Luft -0,4°

### F. Vergleich der Zusammensetzung des Wassers im Winter und im Sommer.

Bezüglich der jahreszeitlichen Schwankungen haben wir damit die Fälle erschöpft, wo wir mehrere Analysen, die sich mehr oder weniger über das ganze Jahr erstrecken, besitzen. Zahlreicher sind die Gletscher, von denen außer der Gesamtanalyse des im Winter ablaufenden Wassers eine summarische Analyse des Sommerwassers zur Zeit der intensiven Gletscherschmelze ausgeführt wurde. Bevor wir diese Serie von Untersuchungen wiedergeben, seien in diesem Zusammenhang noch einmal die Fälle aufgeführt, wo beim selben Gletscher sowohl der Winter- als der Sommerabfluß einer vollständigen Analyse unterzogen wurde. Zur Erleichterung des Vergleiches stellen wir die vier in Betracht kommenden Analysen direkt nebeneinander. Es betrifft die Abflüsse des Unteraar- und des Oberen Grindelwaldgletschers.

Wir sehen zunächst aus dieser Zusammenstellung, daß der Grad der Verdünnung für verschiedene Gletscher stark verschieden sein kann. Während er (aus Glührückstand berechnet) beim Unteraargletscher nur 1,7 beträgt, ist dieses Verhältnis beim Oberen Grindelwaldgletscher 3,8. Aber die Verdünnung ist auch für verschiedene Bestandteile recht ungleich, was am besten in einer Tabelle zum Ausdruck kommt, wo wir das Verhältnis Winter : Sommer für die wichtigsten Bestandteile angeben.

#### Verhältnis Winter- : Sommerwasser für einzelne Bestandteile.

	Oberaar	Oberer Grindelwald
Trockenrückstand	1,7	3,8
Glührückstand	1,7	3,8
Gesamthärte	2,3	3,9
Alkalität	1,9	3,3

	Oberaar	Oberer Grindelwald
Kalium	2,1	2,3
Natrium	1,4	2,4
Calcium	2,0	3,9
Magnesium	1,0	6,7
Hydrocarbonation	2,0	3,5
Sulfation	2,5	10,4
Kieselsäure	1,5	1,5

Aus vorstehenden Zahlen ist in erster Linie ersichtlich, daß die Sulfate die stärkste Reduktion erfahren, was sich indirekt bei der Gesamthärte, beim Calcium und eventuell auch beim Magnesium auswirkt. Die geringere Reduktion der Alkalien erklärt sich durch ihre leichte Löslichkeit. Weniger selbstverständlich erscheint das Verhältnis bei der Kieselsäure. Es läßt vermuten, daß sie als Alkalisilikat, wenn auch in sehr beschränkter Menge, ziemlich rasch in Lösung geht.

Bei einer größeren Anzahl Gletscher wurden ebenfalls Proben von Sommerwasser im August gefaßt, aber nur einer summarischen Analyse unterworfen. Sie sind in den folgenden Tabellen 12 und 13 mit den entsprechenden Angaben der Winterproben aus den Gesamtanalysen zusammengestellt. Die Tabelle 12 enthält außerdem einige Analysen von Proben, welche nicht zur Zeit der Hauptgletscherschmelze, sondern mehr gelegent-

Tabelle 11

	Unteraar- Gletscher		Oberer Grindelwald- Gletscher	
	direkt am Gletscher links der Grotte	—	bei der Betonbrücke	—
	Winter	Sommer	Winter	Sommer
Datum	19. II. 1920	16. VIII. 1920	16. II. 1920	10. VIII. 1920
Stunde	14.50	—	12.40	—
Temperatur des Wassers	+ 0,01°	—	+ 1,26°	—
Temperatur der Luft	+ 4,0°	—	+ 4,0°	—
Suspendierte Stoffe mg/l	3	104	16	104
Trockenrückstand b/180° mg/l	29,0	16,8	105,6	27,4
Glührückstand b/180° mg/l	28,0	16,5	103,2	27,1
Gesamthärte, franz. Härtegrad	1,4	0,6	8,5	2,2
Alkalität, franz. Härtegrad	1,4	0,75	7,2	2,15
Kationen				
Kalium K' mg/l	2,7	1,3	0,9	0,4
Natrium Na' mg/l	1,3	0,9	1,1	0,45
Calcium Ca'' mg/l	4,5	2,2	32,3	8,8
Magnesium Mg'' mg/l	0,4	0,4	2,0	0,3
Ferroion Fe'' mg/l	0,02	0,4	0,06	0,12
Aluminium Al''' mg/l	0,1	0,7	0,24	0,1
Anionen				
Nitrat NO <sub>3</sub> ' mg/l	0,3	0,2	0,7	0,2
Chlor Cl' mg/l	Spur	0,1	0,1	Spur
Sulfat SO <sub>4</sub> '' mg/l	8,7	3,5	22,8	2,2
Hydrocarbonat HCO <sub>3</sub> ' mg/l	17,1	9,8	87,8	26,2
Metakieselsäure H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> mg/l	5,0	3,25	2,1	1,4

**Gletscherabflüsse - Winter- und Sommerwasser**  
(mit einigen intermediären Fassungen)

Tabelle 12

Gletscher	Jahr	Monat	Tag	Stunde	Susp.	Trock.	Glüh-	Gesamt-	Alkali-	
					Stoffe	Rück-	Rück-	Härte	alität	
					mg/l	mg/l	mg/l	Franz.	Franz.	
								Härte-	Härte-	
								grade	grade	
Oberaar . . . . .	1920	II	20.	10.00	1	38,0	37,0	2,5	2,2	
			VIII	16.	—	287	13	12,5	0,6	1,05
Unteraar . . . . .	1920	II	19.	14.50	3	29,0	28,0	1,4	1,4	
			VIII	16.	—	104	16,8	16,5	0,6	0,75
Gauli . . . . .	1921	II	18.	13.40	1	29,2	28,3	1,7	1,4	
			VIII	18.	—	36	4	3	0,2	0,6
Trift . . . . .	1921	II	16.	11.00	0	35,4	33,5	2,4	1,9	
			VIII	12.	—	183	10,5	10,5	0,5	0,7
Rosenlauri, rechte Zunge .	1920	II	17.	15.55	1	86,1	81,4	6,8	5,7	
			VIII	11.	—	29	21	18	1,7	1,9
Oberer Grindelwald . . .	1920	II	16.	12.40	16	105,6	103,2	8,5	7,2	
			VIII	10.	—	104	27,4	27,1	2,2	2,15
Unterer Grindelwald . . .	1920	II	16.	17.53	1	189,5	176,3	13,6	5,95	
			V	17.	7.30	269	57	55	4,1	3,8
			VIII	10.	—	182	31,5	30	2,4	2,55
Kanderfirn-Alpetli . . . .	1920	II	23.	13.57	14	315,9	311,4	25,3	6,2	
			IX	12.	15.00	1200	35	35	3,2	2,65
			XI	18.	—	132	278	259	20,75	5,8
			XI	24.	—	—	352,5	339,5	25,2	5,15
Lötschenberg . . . . .	1920	II	24.	11.05	—	76,2	73,3	7,2	6,4	
			XI	18.	—	—	71,5	69,5	6,0	5,7
			XI	24.	—	—	79	78	7,3	6,8
Hüfi . . . . .	1921	II	16.	12.00	1	77,5	73	7,0	5,9	
			VIII	20.	16.10	298	39	38,5	3,1	3,3
				21.	6.30	142	42	41	3,1	3,25
Biferten . . . . .	1921	II	19.	9.15	4	92,3	88,5	8,5	7,6	
			VIII	23.	16.35	155	57	55,5	4,9	4,9
Rhône . . . . .	1920	III	1.	—	21	42,5	42,6	3,0	3,2	
			VIII	17.	—	89	7	6,5	0,2	0,6
Fiescher, l. Zunge . . . .	1920	III	4.	8.52	64	34,7	33,1	2,0	1,45	
			VIII	18.	—	200	17	16	0,8	1,0
Fiescher, r. Zunge, ob. B. .				—	251	4	3	0,2	0,45	
			Fiescher, r. Zunge, unt. B.		—	208	8	6	0,4	0,7
Aletsch . . . . .	1920	III	6.	9.38	81	49,9	48,3	2,9	1,9	
			VIII	19.	—	288	20	17	0,9	1,1

**Gletscherabflüsse - Winter- und Sommerwasser**  
(mit einigen intermediären Fassungen)

Tabelle 13

Gletscher	Jahr	Monat	Tag	Stunde	Susp.	Trock.	Glüh-	Gesamt-	Alkali-	
					Stoffe	Rück-	Rück-	Härte	tät	
					mg/l	mg/l	mg/l	Franz.	Franz.	
								Härte-	Härte-	
								grade	grade	
Gorner (inkl. Furggbach) . . . . .	1920	III	30.	14.05	2	98,7	92,0	8,2	4,5	
			VIII	14.	—	292	39	36	3,2	3,1
Furggbach allein . . . . .		VIII	14.	—	414	50,5	50	4,5	4,45	
Z'Mutt . . . . .	1921	III	5.	10.35	4	74,5	70,4	5,7	3,7	
			VIII	16.	—	663	44	44	3,3	3,4
Findelen . . . . .	1920	III	29.	8.53	12	858,0	849,0	64,8	6,0	
			VIII	14.	10.15	937	47,5	45	3,3	2,6
Schwarzenberg . . . . .	1921	III	9.	8.15	1257	96,8	92,8	7,3	5,1	
			III	17.	7.00	34	49,7	47,2	3,7	2,9
			VIII	9.	11.05	985	55	54	2,3	2,6
Lang-Jägi . . . . .	1920	II	26.	12.10	3	58,9	57,5	4,0	3,0	
			VIII	20.	—	141	26	25,5	1,0	1,3
			VIII	20.	—	578	71	71	2,2	1,9
			VIII	20.	—	126	23	23	1,2	1,8
Turtmann . . . . .	1921	III	2.	17.15	18	76,0	72,7	6,8	5,3	
			VIII	24.	18.00	218	62	61	3,7	3,5
Arolla . . . . .	1921	II	28.	11.30	5	49,2	46,8	3,2	2,25	
			VIII	22.	10.50	268	26	25	1,15	1,5
Ferpècle . . . . .	1921	II	26.	10.50	3	77,9	73,2	5,0	2,55	
			VIII	21.	11.00	216	20	19	0,5	0,9
Corbassière . . . . .	1921	II	23.	11.02	3	86,0	82,4	7,4	6,3	
			VIII	18.	18.15	1158	38,5	37,5	2,3	2,7
Forno . . . . .	1920	IV	24.	—	0	30,3	29,6	2,3	2,2	
			VIII	19.	—	226	14	14	0,75	1,2
Albigna . . . . .	1921	III	9.	16.30	5	40,1	35,4	1,35	2,2	
			VIII	22.	—	251	12	11,5	0,4	0,8
Fex . . . . .	1921	III	7.	16.45	1	79,2	76,0	6,6	5,4	
			VIII	19.	—	107	19,5	19,5	1,5	1,9
Cambrena . . . . .	1920	IV	25.	12.00	1	41,3	38,5	3,2	2,5	
			VIII	24.	—	59	16,5	16,5	0,95	1,1
Morteratsch . . . . .	1920	IV	21.	9.45	1	41,8	40,0	2,6	2,1	
			IV	25.	14.30	4	29,0	27,5	1,5	1,6
			VIII	24.	—	38	19,5	17,5	0,7	1,0

lich zu intermediären Zeiten gefaßt wurden. Sie können natürlich nicht mit den Augustproben direkt verglichen werden, haben aber immerhin dokumentarisches Interesse.

Für die Diskussion des speziellen Verhältnisses von Winter- und Sommerwasser beschränken wir uns vorderhand auf die im August gefaßten Proben. Natürlich darf die Gleichartigkeit der Bedingungen auch bei diesen nicht überschätzt werden. Doch dürften sie in ihrer Gesamtheit einen Überblick über die bestehenden Verhältnisse erlauben.

Wenn wir also ausschließlich die Gegenüberstellungen der im Februar bis April gefaßten Wasserproben, die einer Gesamtanalyse unterworfen wurden, mit denjenigen vom August in Betracht ziehen und insofern auch die Fassungsstellen einander einigermaßen entsprechen, so fällt zunächst auf, daß die Verminderung des Mineralstoffgehaltes infolge der starken Abschmelzung keineswegs der Vermehrung der Wassermenge entspricht. Wie zu erwarten, ist die Verdünnung im allgemeinen stärker bei hohem Mineralstoffgehalt als bei niedrigem. Jedoch enthalten gerade die Sommerwässer von Gletschern mit kalkreicher Unterlage noch namhafte Beträge an gelösten Stoffen. Man kann sagen, daß auch die Sommerwässer den geologischen Charakter der Unterlage widerspiegeln, wenn auch in weniger ausgeprägtem Maße als die Winterwässer.

Die *suspendierten Stoffe* sind natürlich bei den Sommerwässern in viel größerer Menge vorhanden als im Winter. Ihr Betrag ist beträchtlichen Schwankungen unterworfen, was bei der Mannigfaltigkeit der sie bestimmenden Faktoren nicht verwunderlich ist. Die geologische Struktur der Unterlage scheint dabei eine ziemlich große Rolle zu spielen. Wir haben beim Schwarzenberggletscher gesehen, daß sein Abfluß besonders große Mengen suspendierter Stoffe selbst zur Zeit der geringsten Wasserführung enthalten kann. Bei anderen Gletschern scheint die Sinkstoffführung nie einen hohen Betrag zu erreichen. Die Zahl der hier ermittelten Daten reicht natürlich für Feststellung weiterer Gesetzmäßigkeiten nicht aus.

Besonders auffallend ist, daß bei den Sommerwässern die Alkalität oft ein bis mehrere Zehntelgrade höher ist als die Gesamthärte. Wir haben schon bei der Vergleichung von Unteraar- und Oberem Grindelwaldgletscher gesehen, daß die Gesamthärte im Sommerwasser stärker vermindert erscheint als die Alkalität, diese wieder stärker als die Kieselsäure. Bei den sonst schon niedrigen Alkalitäten dieser Gewässer scheinen daher die Silikate eine nicht mehr zu vernachlässigende Rolle gegenüber den Bicarbonaten zu spielen. Obschon die Silikate im allgemeinen zu den schwerstlöslichen Substanzen zählen, scheinen sie, bzw. wenigstens gewisse Arten derselben, vom Schmelzwasser des Gletschers ziemlich rasch angegriffen zu werden. Sie stehen ja in der Regel in ausgiebigster Menge und meist auch in feinsten Verteilung zur Verfügung. Wir kommen auf die Einzelheiten des Verhältnisses von Winterwasser zu Sommerwasser im Abschnitt «Schlußfolgerungen» zurück.

### **G. Die Tagesschwankungen der Zusammensetzung des Wassers bei Gletscherabflüssen.**

Um die täglichen Schwankungen der gelösten Stoffe, zugleich auch der Temperatur und der Schwebstoffe eines Gletscherabflusses kennenzulernen, wurden am 14. und 15. September 1920 am Oberen Grindelwaldgletscher während 24 Stunden Proben in Zwischenräumen von je drei Stunden gefaßt und jeweils gleichzeitig genaue Temperaturmessungen vorgenommen. Die Resultate dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 14 dargestellt.

Was zunächst die Wassertemperatur betrifft, so erreicht sie ihr Maximum im frühen Nachmittag und sinkt bereits gegen Abend auf ein Niveau, das sich fast die ganze Nacht

hindurch aufrechterhält und nur am Morgen noch um einen geringen Betrag tiefer sinkt. Gegen Mittag steigt die Temperatur wieder langsam. Demgegenüber sind die Schwankungen der Temperatur in der Luft mehr als zehnfach so stark.

Die Schwebestoffe erreichen ihr Maximum erst etwa um 18 Uhr, vermutlich gleichzeitig mit der größten Wasserführung. Sie nehmen sodann ziemlich regelmäßig ab, und zwar wiederum einige Stunden über das Temperaturminimum hinaus, um erst gegen

**Oberer Grindelwaldgletscher.**  
(Proben gefaßt beim unteren Steg.)

Tag eszeiten - 14. und 15. September 1920.

Tabelle 14

Tag	Stunde	Temperatur des Wassers ° C	Temperatur der Luft ° C	Suspen- dierte Stoffe mg/l	Trocken- Rückstand mg/l	Glüh- Rückstand mg/l	Gesamt- Härte Franz. Härtegrad	Alkalität Franz. Härtegrad
14.	12.30	0,85	9,85	32	34	33	2,4	2,6
	15.00	0,85	11,0	34	35	34	2,4	2,45
	18.00	0,5	9,7	42	35	34	2,45	2,6
	21.00	0,5	9,7	32	32	32	2,4	2,5
15.	0.00	0,5	8,2	25	33,5	33,5	2,6	2,7
	3.00	0,5	7,0	24	35	35	2,5	2,65
	6.00	0,4	4,3	22	37	36	2,7	2,65
	9.00	0,45	4,6	20	36	35	2,6	2,65
	12.00	0,65	10,2	26	33	33	2,7	2,6
Vor dem Gletschertor Beim oberen Steg								
14.	18.15	0,5	8,2	45	32,5	32	2,5	2,6

Mittag wieder zuzunehmen. Die gelösten Stoffe ändern sich indessen nur sehr wenig. Bemerkenswert ist der Umstand, daß um 6 Uhr gleichzeitig mit dem Maximum der gelösten Stoffe die Gesamthärte vorübergehend die Oberhand über die Alkalität gewinnt.

## H. Die Frage nach dem Verhältnis von Schmelzwasser zu Quellwasser in den winterlichen Gletscherabflüssen.

### 1. Allgemeines.

Wie schon in der Einleitung bemerkt, liegt eine Hauptschwierigkeit für die Beantwortung dieser Frage auf Grund chemischer Analysen schon in der Definition der beiden Begriffe Schmelz- und Quellwasser. Wir müssen uns vergegenwärtigen, daß dieselben nicht auf Grund ihrer chemischen Natur, sondern in erster Linie auf Grund von Unterschieden der Entstehungsweise, bzw. Herkunft unterschieden werden. Im allgemeinen sind damit allerdings meist auch Unterschiede in den chemischen Eigenschaften verbunden. Die chemischen Merkmale sind aber gleichzeitig durch verschiedene andere Faktoren bestimmt. Ferner können wir es bei den winterlichen Gletscherabflüssen noch mit Wasser zu tun haben, für welches weder die Bezeichnung Schmelzwasser noch Quellwasser in vollem Sinne zutrifft. In der Hydrologie spricht man von «Oberflächenwasser», worunter man solches Wasser versteht, welches entweder die Erdoberfläche gar nicht verlassen hat oder nur ganz wenig tief in die Erde eingedrungen ist. Beim Gletscher hat

man als Oberfläche natürlich nicht die Oberfläche des Eises, sondern die Berührungsfläche von Eis mit der Unterlage in Betracht zu ziehen. Das an der Eisoberfläche gebildete Schmelzwasser wird allerdings zunächst noch über Eis fließen, früher oder später aber in der Regel auf den Grund des Gletschers gelangen und dort Gelegenheit finden, mineralische Stoffe aufzunehmen, bevor es den Gletscher wieder verläßt. Solches Wasser wird in seinen chemischen Eigenschaften alle Übergänge zwischen reinem Schmelz- und typischem Quellwasser annehmen können. Es kann leicht dieselbe Zusammensetzung aufweisen wie ein Gemisch beider, ist aber in der Bildungsweise durchaus von einem solchen verschieden.

Im Laufe des Sommers und Herbstes kann sich oft auch Regenwasser dem in die Spalten dringenden Schmelzwasser beimischen. Die Wasserzirkulation wird in diesem Falle meist so stark sein, daß es den Gletscher bald wieder verlassen wird; es sei denn, daß es in ein größeres Becken gelange, von wo es erst nach längerer Zeit abfließt. Im winterlichen Abfluß spielt Regenwasser ohne Zweifel keine nennenswerte Rolle.

Eine wichtige Frage ist nun, inwiefern das auf verschiedene Art entstandene Schmelzwasser als solches, d. h. als reines Schmelzprodukt in den Gletscherausfluß gelangt, oder ob es auf dem Wege bis zum Austritt aus dem Gletscher Gelegenheit findet, sich mit Mineralstoffen zu laden. In ersterem Falle wäre die Beantwortung der im Titel angeführten Frage wesentlich erleichtert, indem man es mit einer einfachen Verdünnung von typischem Quellwasser zu tun hätte. Wenn das Schmelzwasser aber seinerseits schon Mineralstoffe aufgenommen hat, deren Betrag natürlich schwankend sein wird, so ist es offenbar im allgemeinen nicht möglich, auf chemischem Wege das Verhältnis beider Wasserarten festzustellen, ausgenommen vielleicht einzelne spezielle Fälle.

Ein weiterer Umstand muß in Betracht gezogen werden. Bekanntlich ist das Gletschereis namentlich in den unteren Partien des Gletschers vielfach mit Gesteinsmaterial durchsetzt, wobei die Zerkleinerung und damit der Berührungsgrad alle möglichen Stufen erreichen kann. Welches ist die Zusammensetzung des Schmelzwassers aus solchem moränehaltigem Eis?

Schließlich ist noch zu bemerken, daß der Gletscherbach zum Teil durch Quellbäche aus seitlichen Tälern gespeisen sein kann. Quellwasser, dessen Temperatur wesentlich über null Grad liegt, wird einen gewissen Betrag an Gletschereis schmelzen und dadurch eine etwelche Verdünnung erfahren. Sie wird in hohem Grade vom Ort des Quellaustrittes abhängen.

In seinem Vortrag «Zur Hydrologie des Hochgebirges der Schweizer Alpen» sagte Dr. *Lütschg*: «Zur Beurteilung der Frage, ob das Wasser der Gletscherabflüsse Schmelz- oder Quellwasser sei, ist ferner von Wichtigkeit zu wissen, inwieweit sich seine chemische Zusammensetzung bei oberflächlicher Berührung des Untergrundes (Fels, Geröll, Moränenmaterial usw.) ändert. Denn man könnte z. B. annehmen, daß das Wasser, welches am Gletschertor zum Vorschein kommt, seine Entstehung der Abschmelzung durch die Erdwärme verdanke, also Schmelzwasser sei, die gefundenen Mineralstoffe aber auf seinem Wege am Grunde des Gletschers bis zum Austritt am Gletschertor aus dem Gestein aufgenommen habe. Um darüber Anhaltspunkte zu erhalten, wurden für eine Reihe von Gewässern auch Wasserproben an verschiedenen Stellen eines und desselben Flußlaufes entnommen, wobei einerseits die wesentlichen Zuflüsse berücksichtigt, andererseits nach Möglichkeit Strecken gewählt wurden, wo nur sehr wenig oder gar keine Zuflüsse zu erwarten waren und zudem einfache geologische Verhältnisse vorlagen. Als solche kamen der Oberlauf der Aare im Haslital und die Schwarze Lütschine von Grindelwald bis Zweilütschinen in Betracht. Überdies wurden noch die Wasser des Justistals (Seiten-

tal des Thunerseebeckens), des Furggbaches und Ofentalbaches im oberen Saastal in ähnlicher Weise untersucht.»

Die Ergebnisse konnten damals im Rahmen des Vortrages nicht Platz finden und sollen hier zur Diskussion obiger Frage herangezogen werden.

## 2. Analysen von Wasser an verschiedenen Stellen desselben Gewässers.

### a) Oberlauf der Aare (Haslital).

2. April 1921.

Tabelle 15

Gewässer und Fassungsstelle	Stunde	Temperatur des Wassers ° C	Trocken-Rückstand mg/l	Glüh-Rückstand mg/l	Gesamt-Härte Franz. Härtegr.	Alkalität Franz. Härtegr.
Aare oberhalb Grimselsee . . . . .	7.45	0	26	25	1,35	1,4
Abfluß des Grimselsees . . . . .	7.30	0	7	6	0,35	0,6
Aare unterh. Abfluß Grimselsee (oberhalb Spitallamm)	7.50	0	25	23	1,2	1,3
Aare unterhalb Spitallamm, Räterichsboden . . . . .	8.40	0,2	22	21	1,15	1,35
Gelmerbach . . . . .	9.50	2	12	12	0,45	0,85
Aare oberhalb Handeck . . . . .	10.20	2	17	16	0,7	1,0
Aerlenbach . . . . .	10.30	3	11	9	0,4	0,5
Aare unterhalb Handeck . . . . .	10.40	2,2	17,5	15,5	0,65	0,9
Aare bei Guttannen . . . . .	11.45	4,8	22,5	22	0,8	0,95
Aare bei Tönende Fluh . . . . .	13.10	6,7	24	24	1,3	1,2
Aare bei Unterurbach . . . . .	14.05	7,5	30,5	29,5	1,8	1,4
Urbachwasser . . . . .	14.20	9	70,5	71,5	6,5	6,1
Unterswasser . . . . .	14.45	7	94	92,5	7,5	7,5
Aare oberhalb Aareschlucht . . . . .	15.20	8,5	58,5	55	4,6	4,1
Aare unterhalb Aareschlucht . . . . .	16.25	8,5	73,5	71	5,8	5,75
Reichenbach . . . . .	16.10	6	134	133,5	10,9	11,6
Alpbach . . . . .	16.40	10	153	151	13,9	12,6
Aare bei Brienzwiler . . . . .	17.10	9	89,5	91,5	8,0	7,2

Wir besprechen zunächst die Einzelresultate, um am Schluß die sich daraus ergebenden Folgerungen zu ziehen.

*Aare oberhalb Abfluß Grimselsee.* Dieses Wasser, welches die Summe der Gletscherabflüsse von Oberaar- und Unteraargletscher darstellt, ist bereits etwas mineralstoffärmer als das Winterwasser selbst des letzteren Gletschers, welches am 19. Februar 1920 gefaßt wurde, also etwa anderthalb Monate früher im Jahr.

*Abfluß des Grimselsees.* Das Wasser des Grimselsees scheint im wesentlichen Schneeschmelzwasser zu sein, das auf den fast nackten Granitfelsen der Umgebung nur sehr wenig Mineralstoffe aufzunehmen Gelegenheit hatte.

*Aare unterhalb Abfluß Grimselsee, oberhalb Spitallamm.* Durch den Zufluß des vorigen Wassers ist dasjenige von den Gletschern leicht verdünnt worden. Doch scheint die Mischung noch nicht vollständig erfolgt zu sein.

*Aare unterhalb Spitallamm, Räterichsboden.* Man sollte erwarten, daß die intensive Berührung mit dem Gestein in der Schlucht eher eine Anreicherung an Mineralstoffen zur Folge hätte. Statt dessen finden wir eine leichte Verminderung derselben. Sie ist vermutlich dadurch zu erklären, daß in der Schlucht erst eine völlige Mischung der beiden erstgenannten Gewässer zustande kam.

*Gelmerbach.* Dieses Wasser steht in der Mitte zwischen den beiden zuerst erwähnten Gewässern. Es verdankt seine Entstehung zwar auch zum Teil kleineren Gletschern, wozu aber wahrscheinlich beträchtliche Mengen Schneeschmelzwasser aus der Region des Gelmersees kommen dürften.

*Aare oberhalb Handeck.* Das Wasser der Aare hat durch den eben erwähnten Zufluß, vermutlich übrigens schon durch den Bächlisbach und andere kleine Wasserläufe, eine beträchtliche Verdünnung erfahren.

*Aerlenbach.* Als Abfluß zweier kleiner Gletscher ist dieses Gewässer dem Gelmerbach analog und daher demselben auch in der Zusammensetzung sehr ähnlich. Wie bekannt, ergießt sich dieses Wasser sozusagen inmitten des Handeckfalles in die Aare.

*Aare unterhalb Handeck.* Der Wasserfall bedingt keine Änderung in der Zusammensetzung. Höchstens ist eine ganz leichte Verdünnung durch den Aerlenbach angedeutet.

*Aare bei Guttannen.* Von der Handeck bis Guttannen erhält die Aare nur einige unbedeutende Zuflüsse. Eigentümlich ist die Zunahme der Gesamtmineralstoffe, während sie bei den Härtegraden kaum bemerkbar ist.

*Aare bei Tönende Fluh.* Die Tönende Fluh befindet sich etwa auf halbem Wege zwischen Guttannen und Innertkirchen. Bei der Tönenden Fluh ist schon eine merkliche Zunahme der Gesamthärte festzustellen. Insbesondere ist sie hier zum erstenmal etwas höher als die Alkalität.

*Aare bei Unterurbach.* Die Aare ist hier in das Gebiet ausgesprochen sedimentärer Schichten eingetreten. Die Gesamtmineralstoffe sowie die Gesamthärte haben deutlich zugenommen. *Sie betragen aber immer noch weniger, als wir sie beim Winterwasser des Oberaargletschers gefunden haben.*

*Urbachwasser.* Wir begegnen hier zum erstenmal einem Wasser mit beträchtlichem Kalkgehalt. Als Abfluß des Gauligletschers besitzt es zwar, wie wir seinerzeit gesehen haben, noch ganz den Charakter des Wassers aus kristallinem Gebiet. Auf seinem ziemlich langen Wege bis zum Einfluß in die Aare hat es aber vermutlich eine ganze Reihe von Zuflüssen aus reinem Kalkgebiet erhalten.

*Unterwasser.* Das Unterwasser entspringt zunächst dem Steingletscher, nimmt sodann den Abfluß des Triftgletschers auf, der, wie wir gesehen haben, ein mineralstoffarmes Wasser liefert. Dazu kommt aber eine ganze Reihe kleinerer Quellbäche aus Kalkgebiet und der nicht unbedeutende Zufluß aus dem Gental.

*Aare oberhalb Aareschlucht.* Gegenüber dem Aarewasser bei Unterurbach macht sich natürlich der Einfluß der beiden vorgenannten Gewässer geltend. Die Gesamtmineralstoffe haben um etwa 26 mg, Gesamthärte und Alkalität um 2,8, resp. 2,7 französische Härtegrade zugenommen. Es handelt sich also im wesentlichen um eine Zunahme an Calciumbicarbonat.

*Aare unterhalb Aareschlucht.* Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Spitallamm und Handeckfall haben wir hier eine beträchtliche Zunahme der Mineralstoffe. Man könnte also glauben, daß die intensive Berührung mit dem nun vorwiegend aus Kalk bestehenden Gestein eine Aufnahme von Calciumbicarbonat bewirkt habe. Wahrscheinlicher ist aber, daß, wie in der Spitallamm, die energische Bewegung des Wassers erst die völlige *Mischung* herbeigeführt habe.

*Reichenbach.* Beim Reichenbach sehen wir wiederum Gesamthärte und Alkalität gegenüber Urbachwasser und Unterwasser wesentlich erhöht. Die Kalkgesteine walten in seinem Einzugsgebiet noch mehr vor als bei letzterem. Immerhin deutet das Vorwiegen der Alkalität über die Gesamthärte auf einen ziemlich starken Prozentsatz von Schmelzwasser.

*Alpbach.* Das Einzugsgebiet dieses Baches weist gar keine Gletscher auf. Die Zusammensetzung des Wassers ist demgemäß die eines Bergbaches, etwa wie der Veveyse oder der Baye de Montreux, in ihrem Oberlauf.

*Aare bei Brienzwiler.* Wie zu erwarten, hat das Aarewasser an dieser Stelle gegenüber dem Austritt aus der Aareschlucht einen vermehrten Mineralstoffgehalt. Der Einfluß der beiden vorgenannten Gewässer kommt zwar nicht besonders stark zum Ausdruck. Es ist aber zu bemerken, daß die Wasserführung der Aare bei Meiringen schon eine recht erhebliche ist, so daß neue Zuflüsse, die nicht sehr wasserreich sind, keine großen Änderungen in der Zusammensetzung mehr hervorbringen.

Mit Hinsicht auf unsere mehrfach erwähnte Fragestellung sehen wir aus dieser Versuchsreihe, daß für das ganze kristalline Gebiet die Abflüsse der großen Gletscher den höchsten Mineralstoffgehalt aufweisen. Keiner der weiteren Zuflüsse bis zur Handeck, die doch zum Teil beträchtliche Wege über offenes Gestein zurücklegen, enthielt annähernd so viel gelöste Stoffe wie der erste Gletscherbach oder gar wie der winterliche Abfluß des Oberaargletschers. Wir können daraus schließen, daß bei den großen Gletschern die Bedingungen für Quellwasserbildung besonders günstig sind.

Bemerkenswert ist ferner, daß noch bei Tönende Fluh, wo die Aare zwar noch fast keine sedimentären Schichten berührt hat, der Betrag an gelösten Stoffen, den wir im Abfluß von Oberaar- und Unteraargletscher angetroffen haben, kaum erst erreicht wird. Das Aarewasser hat sich also auf dem etwa 16 km langen Wege über Granit und kristalline Schiefer vom Grimselhospiz bis dahin nicht mehr mit Mineralstoffen beladen, als es schon beim Austritt der Gletscher der Fall war. Diese Feststellung ist für unsere Hauptfrage von größter Wichtigkeit. Sie zeigt, daß der Mineralstoffgehalt der winterlichen Gletscherabflüsse nicht nur von einer oberflächlichen Berührung von Schmelzwasser mit der Gletscherunterlage herrühren kann, sondern typischem Quellwasser zuzuschreiben ist.

Demgegenüber ist die Frage betreffend das Verhältnis zwischen Aarewasser oberhalb und unterhalb Aareschlucht von untergeordneter Bedeutung. Nachdem die Zuflüsse Urbachwasser und Unterwasser den Mineralstoffgehalt um 28, bzw. 25,5 mg/l ansteigen ließen, finden wir nach dem Passieren der Schlucht nochmals eine Zunahme von 15, bzw. 16 mg/l. Es fragt sich nun, ob dieser neue Anstieg einer Aufnahme von Kalk aus dem Gestein der Schlucht (1) oder dem in die Schlucht mündenden kleinen Bach (2) oder im Flußbett liegenden Quellen (3) oder endlich einer vorher noch nicht völlig erfolgten Mischung mit dem Unterwasser (4) zuzuschreiben sei. Von den erwähnten Möglichkeiten müssen wohl die zweite und dritte ausgeschlossen werden, da die Wassermenge des Baches im Vergleich zu derjenigen der Aare doch zu gering ist, daß ein solcher Einfluß auf die Zusammensetzung zustande kommen könnte. Dasselbe kann wohl bezüglich etwa vorhandener Quellen im Flußbett gesagt werden. Zur Entscheidung zwischen den Möglichkeiten 1 und 4 müßte man einmal die Wasserführung der Aare in Unterurbach, andererseits diejenige von Urbach- und Unterwasser einigermaßen genau kennen, um die Zusammensetzung des Gemisches der drei Gewässer berechnen und mit dem Resultat von oberhalb der Schlucht vergleichen zu können. Nimmt man die Wassermengen von Urbachwasser und Unterwasser zu je der Hälfte derjenigen der Aare an, so findet man allerdings recht annähernd die Zusammensetzung, welche oberhalb der Schlucht gefunden wurde. Gleichwohl sind noch zwei Gründe anzuführen, die für Annahme 4 sprechen: Die Probe «oberhalb Aareschlucht» wurde am linken Aareufer gefaßt. Da der Einfluß des Unterwassers nur etwa 800 m oberhalb auf der rechten Seite erfolgt und das Gefälle auf dieser Strecke gering ist, so ist leicht denkbar, daß die Mischung an der Fassungsstelle noch nicht vollständig war. Ferner ist beachtenswert, daß die Differenz Gesamt-

härte minus Alkalität oberhalb der Aareschlucht noch 0,5 französische Härtegrade beträgt (entsprechend den Differenzen bei «Aare bei Unterurbach» und bei «Urbachwasser»), unterhalb der Aareschlucht aber auf 0,05 Grade reduziert ist, was dem Verhältnis beim Unterwasser angepaßt erscheint.

Trotz dieser Wahrscheinlichkeitsgründe möchte ich die Kalkaufnahme in der Aareschlucht nicht definitiv in Abrede stellen. Zur Klarstellung der Frage wären wohl wiederholte genaue Untersuchungen, womöglich mit Berücksichtigung der Wassermengen, erforderlich. Im übrigen werden die Geologen hier, wie beim Verlauf des Haslitalles überhaupt, noch ein Wort mitzusprechen haben. Ich habe mich in dieser Beziehung auf Andeutungen beschränkt, die ich teils der geologischen Übersichtskarte der Schweiz, teils «Exkursion 49» in «Geologischer Führer der Schweiz» entnommen habe.

#### b) Schwarze Lüttschine.

Außer der eben besprochenen Versuchsreihe wurden noch einige andere in ähnlichem Sinne durchgeführt. Die nachstehende, welche den Lauf der Schwarzen Lüttschine vom Oberen Grindelwaldgletscher bis nach Zweilüttschinen betrifft, kam unmittelbar vor der Serie des Haslitalles zur Ausführung.

**Schwarze Lüttschine**  
vom Oberen Grindelwaldgletscher bis Zweilüttschinen.  
31. März 1921.

Tabelle 16

Gewässer	Stunde	Temperatur des Wassers (Luft) ° C	Susp. Stoffe mg/l	Trocken-Rückstand mg/l	Glüh-Rückstand mg/l	Gesamt-Härte	
						Franz. Härtegr.	Alkalität Franz. Härtegr.
Abfluß des Oberen Grindelwaldgletschers . . . . .	8.15	0 (4)	24	96	96	8,1	6,9
Bergelbach am Weg zum Hotel Wetterhorn . . . . .	8.35	2	91	144	140	12,2	9,9
Lüttschine vor Zufluß vom Unteren Gletscher . . . . .	10.00	3 (5)	73	156	152	13,6	11,6
Abfluß des Unteren Grindelwaldgletschers . . . . .	10.15	1	5	151	150	11,6	6,4
Schwarze Lüttschine nach Zusammenfluß beider Gl'abflüsse .	10.40	4	61	162	159	14,4	11,5
Fallbach . . . . .	12.10	4	klar	131	127	11,8	10,5
Lüttschine bei Burglauenen . .	12.30	6,7	21	164,5	159,5	14,2	12,05
Schwarze Lüttschine vor Zusammenfluß bei Zweilüttschinen .	15.00	8,5	16	169,5	164,5	14,8	12,45
Weißer Lüttschine vor Zusammenfluß . . . . .	15.20	8,5	7	150	150	12,7	11,2
Lüttschine nach Zusammenfluß .	15.40	8,5	12	163	158	13,9	12,4

*Abfluß des Oberen Grindelwaldgletschers.* Dieses Wasser enthält schon nicht mehr das Maximum der gelösten Mineralstoffe, weicht aber nur wenig davon ab.

*Bergelbach.* Obschon die Trübung und die Menge der suspendierten Stoffe die Anwesenheit von Schneeschmelzwasser andeuten, ist dieses Wasser bedeutend reicher an gelösten Stoffen als der Gletscherabfluß. Es muß aber berücksichtigt werden, daß der Bergelbach von der anderen Talseite herkommt, welche in geologischer Beziehung stark verschieden ist vom Untergrund des Gletschers.

*Lütschine vor Zufluß vom Unteren Gletscher.* Gesamtmineralstoffe und Härtegrade haben eine beträchtliche Zunahme erfahren, die wahrscheinlich den weiteren rechtsseitigen Zuflüssen nach dem Bergelbach (Mühlebach u. a.) zuzuschreiben ist.

*Abfluß des Unteren Grindelwaldgletschers.* Verglichen mit der Gesamtanalyse (Nr. 11) dieses Gletscherabflusses haben wir wie beim Oberen Gletscher bereits eine gewisse Gehaltsverminderung, die in erster Linie in der Summe der Bestandteile zum Ausdruck kommt. Gegenüber der vorigen Wasserprobe fällt besonders der Unterschied der Alkalität bei gleichem Gesamtstoffgehalt auf.

*Schwarze Lütschine nach Zusammenfluß beider Gletscherabflüsse.* Man würde hier ein Mittel zwischen den beiden vorletzten Nummern erwarten. Statt dessen haben wir in Gesamtmineralstoffen und bei der Gesamthärte sogar noch eine leichte Vermehrung und nur bei der Alkalität eine ganz kleine Verminderung. Wahrscheinlich hängt diese Anomalität einerseits mit der Wasserentnahmestelle (rechtes oder linkes Bachufer) und andererseits mit noch unvollständiger Mischung der verschiedenen Zuflüsse zusammen.

*Fallbach.* Der Fallbach, der etwa 1,5 km vor Burglauenen mündet, ist als linksseitiger Zufluß interessant, da er sich eher als die rechtsseitigen Bäche mit den Gletscherabflüssen vergleichen läßt. In seiner Zusammensetzung steht er dem Bergelbach sehr nahe.

*Lütschine bei Burglauenen.* Die Zusammensetzung ist hier noch fast dieselbe wie nach dem Zusammenfluß.

*Schwarze Lütschine vor Zusammenfluß bei Zweilütschinen.* Auch hier finden wir nur eine sehr geringe Zunahme an gelösten Bestandteilen, die leicht den unbedeutenden weiteren Zuflüssen zwischen Burglauenen und Zweilütschinen zugeschrieben werden kann.

*Weißer Lütschine vor Zusammenfluß mit Schwarzer Lütschine bei Zweilütschinen.* Das Wasser der Weißen Lütschine unterscheidet sich nur wenig von dem der Schwarzen. Beide Härtegrade sind etwas niedriger.

*Lütschine nach Zusammenfluß.* Das vereinigte Wasser entspricht ziemlich dem Mittel der beiden Komponenten mit etwelcher Annäherung an die Schwarze Lütschine.

*Allgemeine Betrachtungen.* Diese Versuchsreihe unterscheidet sich nicht wenig von der vorhergehenden, insofern das Einzugsgebiet der untersuchten Gewässer diesmal fast ausschließlich sedimentärer, und zwar kalkreicher Natur ist. Nur bei den Gletscherabflüssen kommen auch größere Flächen kristallinen Gesteins als Einzugsgebiet in Betracht. So erklärt sich, daß hier im Gegensatz zur vorigen Versuchsreihe die Gletscherabflüsse (wenigstens bezüglich Alkalität) die niedrigeren Härtegrade aufweisen als die gewöhnlichen Zuflüsse. Offen bleibt die Frage, ob die Differenz in den Härtegraden, die wir z. B. zwischen Gletscherabflüssen und Fallbach vorfinden, einzig diesem Unterschied im Einzugsgebiet oder zum Teil auch der Anwesenheit von Schmelzwasser in den ersteren zuzuschreiben sei.

Übereinstimmung mit der Haslitalreihe besteht insofern, als der Gehalt an gelösten Stoffen im Hauptbach sozusagen nur durch Zuflüsse, nicht aber durch die Berührung mit dem Bachbett modifiziert wird.

Wir lassen noch einige kleinere Versuchsreihen ähnlicher Art folgen.

#### c) Justistal

Das Justistal (zwischen Sigriswilergrat und Guggisgrat-Beatenberg) eignete sich für Untersuchungen in vorliegender Frage deshalb besonders gut wegen seiner einfachen Struktur, d. h. fast völliger Abwesenheit von Seitentälern, bzw. seitlichen Zuflüssen. Ungünstig wirkte der Umstand, daß die Probenahme im Frühjahr erfolgte, wo der Oberlauf

noch nicht sichtbar, d. h. gänzlich von Schnee bedeckt war und die erste Gelegenheit, Wasser zu fassen, sich erst beim Auftreten einer Quelle etwa im unteren Drittel des Tales bot.

**Justistal.**  
15. März 1921.

Tabelle 17

Fassungsstelle	Höhe über Meer m	Stunde	Temperatur des Wassers ° C	Trocken-Rückstand mg/l	Glüh-Rückstand mg/l	Gesamt-Härte Franz. Härtegr.	Alkalität Franz. Härtegr.
Quelle bei «Grön» . . . . .	1122	11.15	7	144,5	141,5	14,0	13,2
beim «Türli» . . . . .	975	11.40	5	143	141	12,9	12,4
vor dem Wasserfall . . . . .	800	12.40	10	142	141	13,7	12,6
zwischen Brücke und Stauwehren . . . . .	650	13.40	12	146,5	143	14,2	12,55

Das bei «Grön» im Bachbett als Quelle zutage tretende Wasser – oberhalb dieser Stelle war, wie gesagt, das Bachbett völlig mit Schnee bedeckt und ohne Wasserführung – wurde offenbar auf dem Wege bis zur Stelle beim «Türli» und teilweise auch weiter abwärts, soweit der Schnee reichte, durch Schmelzwasser des umgebenden Schnees etwas verdünnt. Die Verminderung des Gesamtmineralstoffgehaltes und speziell der Gesamthärte glich sich erst nach dem Wasserfall wieder aus. Die Aufnahme von Kalk während des Wasserfalles ist geringfügig und scheint eher in Calciumsulfat als in Carbonat zu bestehen.

**d) Trient.**  
17. und 18. März 1921.

Tabelle 18

Gewässer und Fassungsstelle	Datum	Stunde	Susp. Stoffe mg/l	Trocken-Rückstand mg/l	Glüh-Rückstand mg/l	Gesamt-Härte Franz. Härtegr.	Alkalität Franz. Härtegr.
40 m en aval du glacier. Lit gravier granitique . . . . .	17. III. 21	10.10	93	15	15	0,5	0,7
80 m avant jonction Eau noire. Lit gros blocs granitiques		14.35	7	148	136	10,8	7,2
Eau noire, 120 m amont jonction Trient . . . . .	18. III. 21	14.45	–	66,5	64,5	5,1	5,05
Trient, 150 m aval jonction, Eau noire . . . . .		15.04	2	89	83	6,1	5,4
Trient près Salvan, sous le pont Taillat . . . . .		10.25	–	82	71	6,0	5,3
Trient, sortie des gorges Vernayaz, 40 m amont pont du Mart.-Chât. . . . .		14.02	–	82,5	74	6,4	5,65

Die erste Wasserprobe, 40 m unterhalb des Glacier du Trient, ist typisches Gletscherwasser, das trotz dem frühen Datum schon beträchtlich Schmelzwasser zu enthalten scheint. Die Distanz von der ersten zur zweiten Fassungsstelle beträgt etwa 5 km. Der Unterschied in der Zusammensetzung ist verhältnismäßig sehr groß. Obschon das Gewässer auf dieser Strecke sedimentäre Schichten antrifft, ist es sehr unwahrscheinlich, daß die Aufnahme an gelösten Stoffen der oberflächlichen Berührung des Wassers mit

dem Bachbett zuzuschreiben ist. Von seitlichen Zuflüssen kommt fast nur der Nant noir in Betracht. Ob dieser Bach so viel Mineralstoffe enthält, um die Zusammensetzung des Trientbaches so weitgehend zu beeinflussen, oder ob außerdem weitere mineralstoffreiche Zuflüsse bestehen, müßte durch eine Spezialuntersuchung festgestellt werden. Jedenfalls bleibt die Zusammensetzung vom Einlauf der Eau noire an sehr konstant und erfährt nur noch eine leichte Erhöhung zwischen Salvan und Vernayaz.

Wir entnehmen schließlich noch zwei Versuchsreihen dem bereits erwähnten Spezialwerk über das Mattmarkgebiet: «Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge», S. 266.

e) **Oientalbach.**  
18. März 1921.

Tabelle 19

Fassungsstelle	Entfern. von der Mündung km	Diff. km	Stunde	Trocken- Rück- stand mg/l	Glüh- Rück- stand mg/l	Gesamt- Härte Franz. Härtegr.	Alkali- tät Franz. Härtegr.
am Fuße des Jazzihorns . . .	3,1		11.05	6	5	0,3	0,5
am Fuße des Galmenhorns . .	2,2	0,9	11.55	9	8	0,5	0,6
Eingang der Felsschlucht . . .	1,3	0,9	12.45	8	6	0,5	0,6
Mitte der Felsschlucht . . .	0,7	0,6	13.15	10	9	0,5	0,6
Ausgang der Felsschlucht . .	0,05	0,65	14.30	9	8	0,5	0,5
Mündung in die Saaser Visp*	0,0	0,05	12.35	(12)	(11)	(0,6)	(0,8)

\* 9. 3. 1921.

Der Ofentalbach fließt ausschließlich über kristallines Gestein. Schon der Gletscher ist ganz in solches eingebettet. Demgemäß ist der Gehalt an Mineralstoffen ein äußerst geringer. Eine gewisse Zunahme scheint noch in der vorgelagerten Moräne stattzufinden. Von da an bleiben die Differenzen jedoch fast ganz innerhalb der Fehlergrenzen. Die letzte Zahlenreihe ist einer anderen Versuchsreihe entnommen.

f) **Furgbach.**  
4. April 1921.

Tabelle 20

Fassungsstelle	Entfern. von der Mündung km	Diff. km	Stunde	Trocken- Rück- Stand mg/l	Glüh- Rück- stand mg/l	Gesamt- Härte Franz. Härtegr.	Alkali- tät Franz. Härtegr.
«In den Kehren» . . . . .	5,6		11.40	21	20	1,1	0,6
«Schönenboden» . . . . .	3,4	2,2	13.00	21	20	1,3	0,8
Eingang der Felsschlucht . .	1,3	2,1	15.40	35	34	2,3	1,1
Mündung in die Saaser Visp*	0,0	1,3	(17.50)	(31)	(30)	(2,3)	(1,3)

\* 9. 3. 1921.

Die gelösten Stoffe bleiben sich von der ersten Fassungsstelle bis zur zweiten praktisch gleich. Von der zweiten zur dritten Stelle ist dagegen ein plötzliches Ansteigen

derselben, insbesondere der Gesamthärte, zu bemerken. Ob diese Zunahme, die offenbar hauptsächlich in der Aufnahme von Gips besteht, auf die Zufuhr durch einen Seitenbach oder durch Aufnahme aus dem Bachbett selber zurückzuführen ist, konnte leider nicht festgestellt werden. Jedenfalls scheint in der sich anschließenden Felsschlucht keine weitere Aufnahme an Mineralstoffen mehr zu erfolgen.

### 3. Zusammensetzung des Schmelzwassers aus moränenhaltigem Gletschereis.

Bevor wir zur allgemeinen Besprechung der Schlußfolgerungen aus den vorstehenden Versuchsreihen übergehen, bleibt uns noch die Beantwortung der von Dr. *Lütschg* in seinem Pariser Vortrag und weiter oben (S. 71) erwähnten Spezialfrage durch analytische Befunde zu belegen, nämlich welches die Zusammensetzung des Schmelzwassers aus moränenhaltigem Gletschereis ist. Diesbezügliche Versuche wurden am 14. September 1920 mit Eis vom Oberen Grindelwaldgletscher vorgenommen.

Das Eis wurde in möglichst großen Stücken in weithalsige, mit Glasstopfen versehene Flaschen von 1 l Inhalt gebracht und das Wasser im Laboratorium sofort nach vollständiger Schmelzung untersucht. Zur Bestimmung der suspendierten Stoffe wurde das Schmelzwasser unter leichtem Umschwenken durch ein tariertes, aschenfreies Filter filtriert. Was in der Flasche zurückblieb, wurde ebenfalls getrocknet und unter Berücksichtigung des Wasservolumens als «Sand und Steine» gerechnet. Die Resultate sind in nachstehender Tabelle wiedergegeben.

**Gletschereiswasser.**  
Oberer Grindelwaldgletscher.  
14. September 1920.

Tabelle 21

	Klares Eis am Eingang der Grotte, linke Gletscherseite	Eis mit Moräne an der Oberfläche des Gletschers neben u. etwas unterhalb der Grotte	Klares Eis, rechte Gletscherseite, vis-à-vis Station Wetterhorn- bahn	Trübes Eis, vis-à-vis Station Wetterhorn- bahn	Gletscher- bächlein auf Oberfläche des Eises, vis-à-vis und etwas ober- halb Station Wetterhorn- bahn
Zeit der Fassung . . . . .	13.10	13.30	15.50	15.30	16.00
Sand und Steine, g/l . . . . .	—	108	—	11	—
Suspendierte Stoffe, mg/l . . . . .	25	50	94	5017	—
Trübung . . . . .	nach Filtra- tion ganz schwach opalisierend	nach Filtra- tion ganz schwach opalisierend	nach Filtra- tion ganz schwach opalisierend	nach Filtration ziemlich trüb	nach Filtration klar
Trockenrückstand, mg/l . . . . .	25	31	27,5	50	14
Glührückstand, mg/l . . . . .	17	29	25,5	41	13
Gesamthärte, frz. Härtegr. . . . .	0,6	2,2	1,2	1,8	0,8
Alkalität, frz. Härtegrad . . . . .	0,9	2,7	1,65	2,4	1,1
Verhalten beim Glühen . . . . .	starke Verkohlung	schwache Bräunung	mäßige Bräunung	—	keine Bräunung

Wir sehen aus diesen Analysen, daß ein mineralstofffreies Schmelzwasser praktisch nicht existiert. Selbst das auf der Oberfläche des glatten Gletschereises rinnende Wasser und das aus scheinbar klarem Eis gewonnene Schmelzwasser weisen einen geringen Härtegrad und einen wägbaren Trocken- und Glührückstand auf. Die Herkunft der organischen Substanz in der ersten Probe bleibt allerdings unerklärt. Die zweite Probe von scheinbar klarem Eis enthielt bereits 94 mg/l an suspendierten Stoffen. Es ist daher nicht verwunderlich, daß das daraus resultierende Schmelzwasser auch schon etwas mehr Mineralstoffe enthielt. Ist das Eis beträchtlich von Moräne durchsetzt, so liefert es bereits ein Wasser, das bezüglich Mineralstoffgehalt dem im Sommer abfließenden Gletscherbach gleichkommt. Interessant ist der Vergleich der beiden moränehaltigen Eisproben. Die erste enthielt sehr viel grobes Material, die andere dagegen viel feine Partikel. Bei der ersteren erreicht die Gesamthärte ihr Maximum; bei der letzteren tritt der Kalk gegenüber dem Ton zurück. Letzterer macht sich in der Trübung nach der Filtration bemerkbar und bedingt vermutlich den verhältnismäßig hohen Betrag an Glührückstand.

Im allgemeinen geht aus vorstehenden Zahlen mit aller Deutlichkeit hervor, daß zwar beim Schmelzen des Gletschereises sozusagen nie ein theoretisch «reines» Wasser entsteht, daß aber andererseits auch bei Anwesenheit reichlicher Mengen von Moränenmaterial der Mineralstoffgehalt nicht über denjenigen hinausgeht, den wir zur Zeit der stärksten Abschmelzung im Gletscherbach vorfinden.

#### 4. Schlußfolgerungen über die Frage nach dem Verhältnis von Schmelz- und Quellwasser in den winterlichen Gletscherabflüssen.

Wir haben uns bisher im wesentlichen auf Wiedergabe der gefundenen Tatsachen und auf Besprechung einzelner Spezialfragen dieses Themas beschränkt, dagegen eine allgemeine Beantwortung der Frage vermieden. Ein endgültiges und abschließendes Urteil wird wohl erst mit Heranziehung weiterer Untersuchungen möglich sein. Sie wird vermutlich für die verschiedenen Gletscher verschieden ausfallen. Daraufhin deuten z. B. die Ergebnisse der folgenden Tabelle 22, in welcher die Analysenzahlen für Winter- und Sommerwasser zueinander in Beziehung gesetzt sind.

Beachtenswert an diesen Zahlen ist vor allem, daß der Wert a:b ausnahmslos größer ist als 1. Nur in ganz wenigen Fällen sinkt er unter 1,5. In der Mehrzahl der Fälle bewegt er sich zwischen 2 und 4 und steigt bis gegen 20 an. Mit anderen Worten *enthält das Winterwasser ohne Ausnahme mehr Mineralstoffe als das Sommerwasser*. Ferner ist die *Verhältniszahl* mit wenigen Ausnahmen (4 auf 27 Fälle) *für die Gesamthärte größer als für den Glührückstand* und *ohne Ausnahme größer als für die Alkalität*.

Wie wir aus diesen Verhältnissen schon vermuten können und die vollständigen Analysen beim Unteraar- und Oberen Grindelwaldgletscher es direkt erkennen lassen, sind für das Winterwasser speziell die Sulfate charakteristisch. Wir können daraus den allgemeinen Schluß ziehen, *daß das Winterwasser in stärkerem Kontakt mit tieferen Erdschichten war*, wo die Sulfate (als relativ leichtlösliche Substanzen) noch weniger ausgewaschen sind.

Im Gegensatz dazu ist die Reduktion der *Carbonate* im Sommerwasser nicht so stark, wie man es bei der gewaltigen Schmelzwasserproduktion erwarten könnte. Bei Gletschern mit vorwiegend kalkhaltigem Untergrund (z. B. Hüfi, Biferten, ferner auch Gorner-Furggbach, Z'Mutt und Turtmann) enthält das Sommerwasser beträchtliche Mengen Carbonate, bzw. Bicarbonate. Die Bildung der letzteren durch Einwirkung der im Schmelzwasser enthaltenen Kohlensäure auf das Gestein scheint ziemlich rasch zu erfolgen. Natürlich steht der Kalk (und gelegentlich der Dolomit) in diesen Fällen in genügender Menge und in feinsten Verteilung zur Verfügung.

Im einzelnen finden wir einige auffallende Verhältnisse. Zunächst ist leicht begreiflich, daß bei den im Winter sehr sulfatreichen Gewässern, wie beim Findelengletscher und beim Kanderfirn, die Verhältniszahl besonders hoch ist. Wir finden aber auch bei einigen mineralstoffarmen Gletscherabflüssen hohe Verhältniszahlen, nämlich in den Fällen, wo beim Sommerwasser ungewöhnlich niedrige Gehaltszahlen vorkommen (Gauli, Rhone, Ferpèche). Ob dies für diese Gletscher wirklich charakteristisch oder nur dem Umstand zuzuschreiben ist, daß die Probenahme zufällig bei besonders starker Abschmelzung erfolgte, muß vorläufig dahingestellt bleiben. Die verhältnismäßig geringe Menge an suspendierten Stoffen beim Gauligletscher spricht eher für erstere Annahme.

Verhältnis Winterwasser : Sommerwasser  
in bezug auf Glührückstand, Gesamthärte und Alkalität.

Tabelle 22

Gletscher	Daten der Fassung		Glührückstand			Gesamthärte			Alkalität		
	a Winter	b Sommer 1920	a mg/l	b mg/l	a : b	a frz. Hgr.	b frz. Hgr.	a : b	a frz. Hgr.	b frz. Hgr.	a : b
Oberaar	20. II. 20	16. VIII	37,0	12,5	3,0	2,5	0,6	4,2	2,2	1,05	2,1
Unteraar	19. II. 20	16. VIII	28,0	16,5	1,7	1,4	0,6	2,3	1,4	0,75	1,9
Gauli	18. II. 21	18. VIII	28,3	3	9,4	1,7	0,2	8,5	1,4	0,6	2,3
Trift	16. II. 21	12. VIII	33,5	10,5	3,2	2,4	0,5	4,8	1,9	0,7	2,7
Rosenlauri	17. II. 20	11. VIII	81,4	18	4,5	6,8	1,7	4,0	5,7	1,9	3,0
Ob. Grindelwald	16. II. 20	10. VIII	103,2	27,1	3,8	8,5	2,2	3,9	7,2	2,15	3,3
Unt. Grindelwald	16. II. 20	10. VIII	176,3	30	5,9	13,6	2,4	5,7	5,95	2,55	2,3
Kanderfirn	23. II. 20	12. IX	311,4	35	8,9	25,3	3,2	7,9	6,2	2,65	2,3
Hüfi	16. II. 21	20. VIII	73,0	38,5	1,9	7,0	3,1	2,3	5,9	3,3	1,8
Biferten	19. II. 21	23. VIII	88,5	55,5	1,6	8,5	4,9	1,7	7,6	4,9	1,55
Rhone	1. III. 20	17. VIII	42,65	6,5	6,6	3,0	0,2	15,0	3,2	0,6	5,3
Fiesch, l. Zunge	3. III. 20	18. VIII	33,1	16	2,1	2,0	0,8	2,5	1,45	1,0	1,45
Aletsch	6. III. 20	19. VIII	48,3	17	2,8	2,9	0,9	3,2	1,9	1,1	1,7
Gorner (Furggbach)	30. III. 20	14. VIII	92,0	36	2,55	8,2	3,2	2,6	4,5	3,1	1,45
Zmutt	5. III. 21	14. VIII	—	50	—	—	4,5	—	—	4,45	—
Zmutt	5. III. 21	16. VIII	70,4	44	1,6	5,7	3,3	1,7	3,7	3,4	1,1
Findelen	29. III. 20	14. VIII	849,0	45	18,9	64,8	3,3	19,6	6,0	3,4	1,8
Schwarzenberg	9. III. 21	9. VIII	92,8	54	1,7	7,3	2,3	3,1	5,1	2,6	2,0
Lang-Jägi	26. II. 20	20. VIII	57,5	23	2,5	4,0	1,2	3,3	3,0	1,8	1,7
Turtmann	2. III. 21	24. VIII	72,7	61	1,2	6,8	3,7	1,8	5,3	3,5	1,5
Arolla	28. II. 21	22. VIII	46,8	25	1,9	3,2	1,15	2,8	2,25	1,5	1,5
Ferpèche	26. II. 21	21. VIII	73,2	19	3,9	5,0	0,5	10,0	2,55	0,9	2,8
Corbassière	23. II. 21	18. VIII	82,4	37,5	2,2	7,4	2,3	3,2	6,3	2,7	2,3
Forno	24. IV. 20	19. VIII	29,6	14	2,1	2,3	0,75	3,1	2,2	1,2	1,8
Albigna	9. III. 21	22. VIII	35,4	11,5	3,1	1,35	0,4	3,4	2,2	0,8	2,8
Fex	7. III. 21	19. VIII	76,0	19,5	3,9	6,6	1,5	4,4	5,4	1,9	2,8
Cambrena	25. IV. 20	24. VIII	38,5	16,5	2,3	3,2	0,95	3,4	2,55	1,1	2,3
Morteratsch	21. IV. 20	24. VIII	40,0	17,5	2,3	2,6	0,7	3,7	2,1	1,0	2,1

Beim Turtmann-gletscher ist der Gesamtmineralstoffgehalt des Sommerwassers im Vergleich zu den Härtegraden auffallend hoch, fast demjenigen des Winters gleichkommend. Es muß also angenommen werden, daß dieses Wasser ungewöhnlich viel lösliche Neutralsalze enthält. Dieselbe Erscheinung finden wir, wenn auch weniger stark ausgeprägt, beim Schwarzenberg-gletscher und, wie aus der Tabelle über Winter- und Sommerwasser hervorgeht, beim linksseitigen Abfluß des Lang-gletschers. Nach Ansicht von Dr. O. Lütschg begegnet das Schmelzwasser oft Gesteinsmaterial, in welchem sich die löslichen Zersetzungsprodukte von Silikaten durch lang andauernde Verwitterung angehäuft haben.

Nach diesen mehr allgemeinen Charakter tragenden Betrachtungen kehren wir zu unserer Hauptfrage zurück: Läßt sich im allgemeinen oder in einzelnen Fällen erkennen, ob das im Winter den Gletschern entströmende Wasser Quellwasser oder Schmelzwasser ist, bzw. inwiefern es sich um ein Gemisch der beiden handelt? Wie wir gesehen haben, gibt die Analyse als solche keinen eindeutigen Aufschluß auf diese Frage, namentlich nicht in bezug auf das Mischungsverhältnis. Sicher ist zunächst nur, daß sich die Zusammensetzung im Winter immer mehr derjenigen von Quellwasser nähert. Es bleibt aber stets die Frage bestehen, ob und inwiefern zur Zeit der geringsten Wasserführung wirklich ausschließlich nur noch Quellwasser zutage tritt oder ob auch dann noch Schmelzwasser mitgeführt wird. Die möglichen Ursachen für Anwesenheit von Schmelzwasser auch im Winter sind ja verschiedener Art, wie die in der Einleitung aus *A. Heims* Handbuch der Gletscherkunde zitierte Aufstellung zeigt.

Entsprechend diesen zahlreichen Möglichkeiten und den auch im übrigen so mannigfaltigen Verhältnissen kann man sich leicht vorstellen, und die Tabelle 22 über die Verhältniszahlen zwischen Winter- und Sommerwasser bestätigt es, daß die obige Frage für die verschiedenen Gletscher auch in verschiedener Weise beantwortet werden muß. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, für jeden Fall den Begriff des Quellwassers zu definieren. In genauer Weise wird dies selten möglich sein, namentlich nicht bei Gletschern mit gemischtem Untergrund. Nur für einigermaßen einheitliche Zusammensetzung des letzteren läßt sich ein Vergleich mit Quellen in nichtvergletschertem Gebiet anstellen. Hierfür wären möglichst zahlreiche und eingehende Analysen von Quellen aus wohldefinierten Gesteinen heranzuziehen. Leider verfügen wir nur über recht beschränkte diesbezügliche Angaben. Die besten derartigen Zusammenstellungen fanden wir in der gedruckten Veröffentlichung eines Vortrages von *Dr. Gust. Nußberger*: «Beitrag zur Kenntnis der Quellenverhältnisse Graubündens und zur Beurteilung von Trinkwasser» (Chur 1917). Wir entnehmen der Broschüre nur die Angaben über Glührückstand und Alkalität, da sozusagen nur sie für unsere Fragen Bedeutung und Wert haben. *Dr. Nußberger* klassifiziert die Quellwässer nach folgenden Gruppen von quellenliefernden Gesteinen:

1. Massengesteine, kristalline Schiefer und Verrucano.
2. Kalk und Dolomit.
3. Rauhacken und Gipse der Trias.
4. Bündner Schiefer.

Wir führen die Ergebnisse, soweit sie sich unzweifelhaft in diese Gruppen einreihen lassen, im übrigen wahllos zusammengestellt, im folgenden möglichst vollständig in Tabellen an.

1. *Quellen aus Massengesteinen, kristallinen Schiefen und Verrucano:*

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Brusio . . . . .	88,0	5,4
Davos-Flüela . . . . .	29,5	2,3
Pontresina . . . . .	57,5	3,4
Mesocco . . . . .	51,0	3,75
Zuoz . . . . .	30,0	2,25
Disentis . . . . .	80,5	4,5
Nordseite von St. Moritz . . . . .	45,0	3,25
Nordseite von St. Moritz . . . . .	50,0	4,9
aus Gneis, nördlich von Zuoz . . . . .	56,0	4,55
aus Gneis, mehr oberflächlich . . . . .	32,0	2,25
Mittel . . . . .	52,0	3,66

## 2. Quellen aus Kalk und Dolomit:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Bergün . . . . .	264,0	23,75
Brienz . . . . .	184,0	18,08
Plavnatal . . . . .	96,0	9,55
Laax . . . . .	153,5	13,85
Samaden . . . . .	140,0	13,5
Zuoz . . . . .	271,5	22,5
Nordseite von St. Moritz . . . . .	155,0	15,4
Mittel . . . . .	180,6	16,6

## 3. Quellen aus Rauhacken und Gipsen der Trias:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Alvaneu . . . . .	531,0	20,75
St. Moritz . . . . .	1382,0	11,75
Surava . . . . .	638,0	16,0
Zuoz . . . . .	1103,0	5,0
Nordseite von St. Moritz . . . . .	1522,0	11,5
Nordseite von St. Moritz . . . . .	526,0	14,2
Nördlich von Zuoz		
aus Rauhacken und Kristallin . . . . .	1125,0	2,5
aus Rauhacken und Rötidolomit . . . . .	686,0	12,0
Mittel . . . . .	939,1	11,7

## 4. Quellen aus Bündner Schieferen:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Thusis . . . . .	251,0	21,0
Versam . . . . .	224,0	20,7
Riein . . . . .	263,5	21,05
Trimmis . . . . .	257,6	18,25
Saas . . . . .	141,0	10,65
Samnaun . . . . .	228,0	18,65
Sent . . . . .	250,0	23,4
Mittel . . . . .	230,7	19,1

Erwähnt sei schließlich noch ein Quellwasser aus *Lias*, nördlich von *Zuoz*:

Glührückstand 83,5 mg/l  
Alkalität 7,5 franz. Härtegrade

Absichtlich haben wir nicht nur Mittelwerte, sondern die Einzelzahlen angegeben, um einen Begriff der Variabilität zu vermitteln. Andererseits dürfte die Aufstellung der Mittelwerte eine gewisse Berechtigung haben, da die niedrigen Werte die Gefahr zu hoher Mittelwerte vermindern.

Im folgenden stellen wir diese Mittelwerte für die verschiedenen Gesteinstypen zusammen mit entsprechenden Vertretern der winterlichen Gletscherabflüsse, wobei allerdings fast nur solche des ersten Gesteinstyps in Betracht kommen.

1. *Quellwasser* aus Massengesteinen, kristallinen Schiefen und Verrucano und *Abflüsse* von Gletschern mit ausgesprochen kristalliner Unterlage:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Mittel für Quellwasser . . . . .	56,1	3,6
Oberaargletscher . . . . .	37,0	2,2
Unteraargletscher . . . . .	28,0	1,4
Gauligletscher . . . . .	28,3	1,4
Triftgletscher . . . . .	33,5	1,9
Rhonegletscher . . . . .	42,65	3,2
Fieschergletscher . . . . .	33,1	1,45
Aletschgletscher . . . . .	48,3	1,9
Langgletscher . . . . .	57,5	3,0
Fornogletscher . . . . .	29,6	2,15
Albignagletscher . . . . .	35,4	2,2
Cambrenagletscher . . . . .	38,5	2,55
Morteratschgletscher . . . . .	40,0	2,1
Ofentalbach . . . . .	10,7	0,7

2. *Quellwasser* aus Kalk und Dolomit und *Abflüsse* von Gletschern mit ausgesprochener Kalkunterlage:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Mittel für Quellwasser . . . . .	180,6	16,6
Hüfigletscher . . . . .	73,0	5,9

3. *Quellwasser* aus Rauhwacken und Gipsen der Trias und *Abflüsse* von Gletschern mit stark gipshaltiger Unterlage:

	Glührückstand mg/l	Alkalität franz. Härtegrade
Mittel für Quellwasser . . . . .	939,1	11,7
Kanderfirn . . . . .	311,4	6,2
Findelengletscher . . . . .	849,0	6,0

Bei Betrachtung dieser Zahlen müssen wir sagen, daß die Vergleichbarkeit eigentlich fast nur beim kristallinen Gestein eine befriedigende ist. Schon bei «Kalk und Dolomit» können die Löslichkeitsverhältnisse ziemlich verschieden sein, je nachdem es sich um triasische, jurassische oder kretaceische Formationen und noch mehr, je nachdem es sich um massige oder fein verteilte Gesteine handelt. Bei Rauhwacken und Gipsen ist der Wert für Glührückstand hauptsächlich durch den Sättigungsgrad an Gips gegeben, während der Alkalitätsgrad mehr durch das begleitende Gestein bedingt wird.

Immerhin ist schon der Vergleich für die Wasser aus Grundgebirge recht interessant. Der Betrag für den Glührückstand wie für die Alkalität ist mit einer einzigen Ausnahme geringer bei den Gletscherabflüssen als beim Mittelwert für Quellwasser. Die Unterschiede sind freilich unter sich wieder stark verschieden. Einen außergewöhnlichen Fall stellt der Ofentalbach dar. Der äußerst geringe Mineralstoffgehalt scheint nicht nur durch die ausschließliche Anwesenheit von kristallinem Gestein, sondern auch durch die geringe Mächtigkeit des Gletschers, bzw. seiner Moräne bedingt zu sein. Dieser Umstand wird natürlich bei Beurteilung der einzelnen Gletscherabflüsse zu berücksichtigen sein. Jedoch liegt hier ohne Zweifel ein ganz extremer Fall vor, indem die übrigen zur Untersuchung herangezogenen Gletscher fast ausnahmslos zu den größten der Schweiz gehören.

Beim *Aletschgletscher*, bekanntlich unserem größten, nähert sich der Glührückstand schon ziemlich dem Mittelwert für Quellwasser; jedoch bleibt die Alkalität ganz beträchtlich hinter demselben zurück. Man muß also vermuten, daß der erstere seine relative Höhe hauptsächlich den ziemlich reichlich vorhandenen Sulfaten verdankt und daß die niedrige Alkalität eine erhebliche Beimengung von Schmelzwasser anzeigt.

Im Gegensatz hierzu stimmen beim *Langgletscher* beide Werte nahe mit dem Mittelwert für Quellwasser überein.

Ganz unverkennbare Anzeichen für Anwesenheit von Schmelzwasser treffen wir beim *Unteraargletscher*. Hier weichen sowohl Glührückstand wie Alkalität erheblich vom Wert für Quellwasser ab. Die Eigenart dieses Gletscherwassers geht namentlich aus einem Vergleich mit demjenigen des Oberaargletschers hervor. Die beiden Gletscher eignen sich sehr gut für einen Vergleich, weil beide fast parallel zueinander in geologisch sehr ähnlichem Einzugsgebiet liegen.

Das Wasser des Oberaargletschers hat etwas höheren Gehalt an Gesamtmineralstoffen als dasjenige des Unteraargletschers. Dabei ist aber letzteres absolut und namentlich relativ reicher an Sulfaten. Nun sind die sulfatreichen Gewässer unter sonst gleichen Umständen in der Regel auch reicher an Gesamtmineralstoffen. Da beim Winterabfluß des Unteraargletschers gegenüber demjenigen des Oberaargletschers das Gegenteil der Fall ist, können die niedrigen Zahlen für Glührückstand und Alkalität nur durch Anwesenheit beträchtlicher Mengen von Schmelzwasser erklärt werden. Diese Ansicht wird bekräftigt durch das Verhältnis der Härtegrade zueinander. Wir sahen bei Besprechung der Sommerwässer und auch bei den Analysen von Eisschmelzwasser, daß beim Schmelzwasser in der Regel die Alkalität etwas höher ist als die Gesamthärte. Da beim Winterwasser des Unteraargletschers trotz dem relativ erheblichen Sulfatgehalt die beiden Härtegrade gleich sind, haben wir somit einen weiteren Beweisgrund für die Anwesenheit von Schmelzwasser neben Quellwasser.

Bei den beiden Analysen des *Morteratschgletschers* (Nrn. 37 und 38) finden wir auffallend ähnliche Beziehungen, nur daß es sich in diesem Falle um zwei am selben Gletscher zu verschiedenen Zeiten gefaßte Proben handelt. Natürlich können uns diese Analysen keinen direkten Aufschluß geben über die Frage, ob nicht schon die erste Probe Schmelzwasser enthielt. Sie sind aber insofern interessant, weil sie die Wirkung der Schmelzwasserbeimengung auf eine genau bekannte Zusammensetzung zeigen.

Beim Gesamtmineralstoffgehalt ist das Verhältnis sehr ähnlich demjenigen zwischen Oberaar- und Unteraargletscher. Dasselbe ist der Fall für die beiden Härtegrade. Dagegen sind die Alkalien hier beide bei der zweiten Analyse ungefähr in gleichem Maße reduziert wie der Gesamtmineralstoffgehalt, während bei den Aargletschern sozusagen Gleichheit besteht. Die Reduktion ist überhaupt hier, abgesehen von der Kieselsäure, dem Eisen und Aluminium, so allgemein, daß sie füglich als Verdünnung bezeichnet werden kann, während bei Oberaar- und Unteraargletscher ein individueller Unterschied namentlich im Sulfatgehalt zu bestehen scheint. Das Verhältnis von Quellwasser zu Schmelzwasser, aus dem Sulfation berechnet und das letztere sulfatfrei gedacht, ergibt sich zu 60 : 40. Leider können wir eine ähnliche Berechnung nicht auf die Aargletscher anwenden, da offenbar das «Quellwasser» beim Unteraargletscher bedeutend mehr Sulfate (mithin auch mehr Gesamtmineralstoffe) enthält als dasjenige des Oberaargletschers.

Ein zweites Beispiel, wo bei einer wenige Tage später gefaßten Probe vom selben Gletscher die Beimischung von Schmelzwasser unverkennbar ist, haben wir beim Schwarzenberggletscher (An. 23 und 24). Berechnet man die Verdünnung nach dem Sulfatgehalt, so findet man in diesem Falle nur 42 % Quellwasser auf 58 % Schmelzwasser. Bei den

anderen Bestandteilen, besonders beim Natrium, erscheint das Verhältnis mehr zugunsten des Quellwassers. Andererseits sind Eisen, Aluminium, Nitration, Chlorion und Kieselsäure in der zweiten Probe fast gleich, was mit den Eigenschaften von Schmelzwasser gut vereinbar ist. Die Alkalität hat sich der Gesamthärte stark genähert.

Vergleichen wir weiter die winterlichen Gletscherabflüsse aus kristallinem Gebiet mit den Mittelwerten von Quellwasser aus Massengesteinen, so fällt besonders noch der *Gauligletscher* auf mit fast denselben Werten wie der Unteraargletscher. Allerdings ist der Gehalt an Calcium und damit die Gesamthärte etwas höher. Der Prozentsatz an Schmelzwasser mag in diesem Falle also etwas niedriger sein; aber der allgemeine Charakter deutet immer noch auf beträchtliche Beimengung desselben.

Noch geringer scheint der Anteil des Schmelzwassers beim *Triftgletscher* zu sein.

Nicht mit dem Quellwasser in Vergleich gezogen wurde der Abfluß des *Feeigletschers*, südliche Zunge (An. 25). Ohne die geologischen Verhältnisse diskutieren zu wollen, handelt es sich aber hier ohne Zweifel ebenfalls um Gletscherwasser mit ziemlich hohem Gehalt an Schmelzwasser. Darauf deuten einmal schon der niedrige Gehalt an gelösten Stoffen überhaupt, sodann aber auch fast alle übrigen Indizien in diesem Sinne: die Annäherung der Alkalität an die Gesamthärte, der niedrige Calcium- und der sehr niedrige Sulfatgehalt. Sehr auffallend ist bei diesem Wasser allerdings der außergewöhnlich niedrige Kieselsäuregehalt, der sonst in ähnlichen Fällen wenig reduziert erscheint.

Mit Rücksicht auf Glührückstand und Alkalität ist man auch beim *Fieschergletscher* zur Annahme eines namhaften Schmelzwassergehaltes geneigt.

Insofern ein Vergleich mit den Quellen aus «Kalk und Dolomit» vom geologischen Standpunkt aus zulässig erscheint, wäre auch beim *Hüfigletscher* der Anteil an Schmelzwasser recht bedeutend. Aber schon mit Rücksicht auf die geologische Lage im allgemeinen und bei Vergleich mit den Gletschern der Grindelwaldreihe kommt man zu dem Resultat, daß bei diesem Gletscher die Mineralisation des Wassers unter der Norm bleibt, abgesehen davon, daß dies ziemlich wahrscheinlich schon bei der Grindelwaldserie der Fall zu sein scheint.

Damit dürften die Fälle, wo man mit mehr oder weniger Sicherheit auf Beimengung von Schmelzwasser schließen kann, nicht erschöpft sein. Da aber bei der Mehrzahl der Gletscher eine in geologischer Beziehung gemischte Unterlage vorliegt, wo es kaum möglich ist, Normen für das zu erwartende Quellwasser aufzustellen, so verzichten wir auf weitere Mutmaßungen in dieser Hinsicht.

Sicher ist, daß die Zusammensetzung des Wassers sich mit der Verminderung des Ergusses immer mehr derjenigen von reinem Quellwasser nähert und in manchen Fällen eine sehr hohe Mineralisation erreicht. Dennoch scheinen die Fälle, wo wirklich ausschließlich nur noch Quellwasser übrigbleibt, sehr beschränkt zu sein. Vielmehr deutet die Tatsache, daß die Alkalität bei kristallinem Untergrund sich meist um 2, bei stark kalkhaltigem um 6 bewegt und nur maximal auf 8,15 franz. Härtegrade steigt, darauf hin, daß selbst zur Zeit der minimalen Wasserführung stets dem Quellwasser noch eine gewisse Menge Schmelzwasser beigemischt ist.

Wir sehen also, daß von den in der Einleitung nach *A. Heim* angeführten Ursachen für die Existenz der winterlichen Gletscherabflüsse b, d. h. Quellen unter den Gletschern (evtl. auch seitlich derselben), in erster Linie in Betracht kommt. Es bleibt somit noch die Frage zu beantworten, inwiefern die Faktoren a, c und d ebenfalls eine Rolle spielen, bzw. welches der Ursprung des nach vorstehenden Ausführungen in der Mehrzahl der Fälle neben dem Quellwasser vorhandenen Schmelzwassers sei.

Es ist klar, daß der Faktor a, die langsame Aussickerung des im Sommer in den Haarspalten schwammartig aufgespeicherten Wasserüberflusses, während der Übergangs-

zeit von der maximalen zur minimalen Wasserführung überwiegt. Inwiefern er auch zur Zeit der minimalen Wasserführung noch eine Rolle spielt, läßt sich aus den chemischen Befunden nicht ohne weiteres erschen. Hierüber dürften die hydrologischen Messungen eher Aufschluß geben, da sie die Art der Abnahme des Ergusses erkennen lassen.

Was den Faktor c, innere Schmelzung durch den Mechanismus der Bewegung, Druck, Reibung am Grunde usw., betrifft, so dürfte seine Bedeutung gegenüber den anderen ziemlich verschwindend sein. Es sei in diesem Zusammenhang nur darauf hingewiesen, daß etwa durch Druck bei  $0^{\circ}$  oder darunter verflüssigtes Eis bei Nachlassen des Druckes sofort wieder gefriert.

Dagegen ist wohl möglich, daß Faktor d, Schmelzung durch Erdwärme, bei Gletscherzungen, die beträchtlich unter die Zone der mittleren Jahrestemperatur von  $0^{\circ}$  heruntersteigen, einen gewissen Betrag an Schmelzwasser liefern kann. Er wird im Gegensatz zu a keine großen Differenzen zwischen Sommer und Winter aufweisen, da er am Grunde des Eises zur Wirkung gelangt, wo die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen nur geringe sind. Diese Eigenschaft erlaubt vielleicht eine Abgrenzung gegenüber Faktor a, der zeitlich variabel ist, seinem Minimalwert sich allerdings sozusagen asymptotisch nähert.

Schließlich sei noch erwähnt, daß auch die Quellen, insofern ihre Temperatur über  $0^{\circ}$  ist, eine Schmelzung des Eises bewirken. Dieser Betrag kann sehr verschieden sein je nach der Temperatur der Quelle, ihrem Ertrag und namentlich auch je nach dem Ort ihres Auftretens. Nur in seltenen Fällen wird es möglich sein, die Menge des so gelieferten Schmelzwassers zu ermitteln.

## J. ANHANG

### Summarische Analysen einiger weiterer Gebirgsgewässer.

Zur Ergänzung und zu Vergleichszwecken, ferner als ganz bescheidenen Beitrag zum «Chemismus der Schweizer Gewässer» lassen wir noch eine Anzahl von Härtebestimmungen an einigen im Frühjahr 1920 gefaßten Gebirgsgewässern der Ost- und Zentralschweiz folgen. Sie sind, wie die Hauptanalysen der Gletscherabflüsse, nach hydrographischem Prinzip geordnet. Um ihren Charakter als mehr oder weniger ausgesprochenes Gebirgsgewässer anzudeuten, sind die Höhen über Meer soweit möglich für die Fassungsstellen selber, andernfalls für die nächstliegenden Ortschaften angegeben. Leider konnte bei den ersten Untersuchungen nur die Alkalität bestimmt werden, da die Einrichtung für Bestimmung der Gesamthärte noch nicht zur Verfügung stand. Das Material reichte auch nur in wenig Fällen für eine approximative Bestimmung des Trocken- und Glührückstandes.

Die vorliegenden Untersuchungen sind zu lückenhaft und unsere Kenntnis der örtlichen Verhältnisse zu mangelhaft, um diese Ergebnisse im Detail zu besprechen. Im allgemeinen ist natürlich auch bei diesen Gewässern die geologische Struktur des Einzugsgebietes bestimmend für den chemischen Charakter des Wassers. Der Geologe wird vielleicht diese oder jene Eigentümlichkeit erklären können. Zum Vergleich mit den für die Gletscherabflüsse gefundenen Werten dürften diese Angaben, obschon es sich in mehreren Fällen ebenfalls um solche handelt (im weiteren Sinne), nur bedingt herangezogen werden, da die Fassungsstellen in der Regel nicht am Gletscher selber, sondern in etwelcher Entfernung von demselben sich befinden, wo das Gewässer bereits anderweitige Zuflüsse aufgenommen haben konnte.

**H ä r t e g r a d e**  
 einiger Schweizer Gebirgsgewässer.  
 1920.

Trübungsgrade:

- 0 klar
- 1 fast klar
- 2 sehr leicht trüb
- 3 leicht trüb
- 4 trüb
- 5 stark trüb

Tabelle 23

Gewässer	Höhe über Meer  m	Monat	Tag	Stunde	Temp. des Was- sers °C	Grad der Trü- bung	Gesamt- härte Franz. Härte- grade	Alkali- tät Franz. Härte- grade
Vorderrhein, Sedrun . . .	1444	III	15.	—	3,5	0	4,0	3,8
Medelser-Rhein, Alp Scheygia	ca.1800	III	17.	17.15	1,0	0	9,5	5,7
Medelser-Rhein, Acla . . .	1476	III	16.	—	1,0	0	4,1	3,0
Vorderrhein, Surrhein . . .	930	III	12.	17.10	3,3	0	5,7	5,5
Vorderrhein, Ilanz . . . . .	718	III	11.	17.00	3,4	1	9,8	8,5
Julia, Mühlen . . . . .	1461	III	22.	11.40	1,9	0	14,5	8,8
Fallerbach, Mühlen . . . . .	1461	III	22.	10.45	2,2	0	15,7	8,8
Julia, Rofna . . . . .	1458	III	23.	11.50	3,7	0	16,1	9,9
Errbach, Tinzen . . . . .	1289	III	23.	15.30	4,8	0	14,2	11,3
Julia, Savognin . . . . .	1210	III	24.	10.20	5,4	0	15,1	10,8
Ava da Nandro, Mineralquelle	(1210)	III	20.	15.15	4,4	5	40,0	12,6*
Julia, Tiefenkastel . . . . .	889	III	19.	18.05	6,8	4	24,5	12,6
Albula, Bergün . . . . .	1376	IV	7.	11.15	3,5	0	26,4	10,7
Albula, Filisur . . . . .	1084	IV	6.	13.30	3,3	0	28,0	11,4**
Seeabfluß, Davos-Dorf . . .	1561	III	31.	15.35	2,5	0	6,0	4,9
Flüelabach, Davos-Dorf . . .	1561	III	31.	15.45	3,0	0	3,4	3,2
Dischmabach, Davos, Dunkle Säge . . . . .		IV	1.	12.20	4,3	0	3,3	2,6
Sertigbach, Sertig-Säge . . .		IV	1.	17.05	4,2	4	13,2	5,8
Landwasser, Glaris . . . . .	1457	IV	2.	10.30	4,0	***	9,2	6,9

\* Trockenrückstand 560 mg/l

\*\* Trockenrückstand 308 mg/l

\*\*\* schmutzig

Tabelle 23

Gewässer	Höhe über Meer  m	Monat	Tag	Stunde	Temp. des Wassers °C	Grad der Trü- bung	Gesamt- Härte Franz. Härte- grade	Alkali- tät Franz. Härte- grade
Landwasser, Filisur . . . . .	1084	IV	3.	12.00	3,6	1	13,4	9,3
Albula, Tiefenkastel . . . . .	889	III	19.	8.45	4,4	3	26,5	13,0*
Hinterrhein, Rothenbrunnen .	625	III	10.	15.25	3,2	2	21,0	12,8
Rhein, Felsberg . . . . .	ca. 570	III	9.	16.30	3,0	4	14,4	11,9
Plessur, Litzirüti . . . . .	1455	III	6.	14.50	4,6	0	15,7	12,3
Vereinabach, Ober-Novai . . .	ca.1800	III	30.	14.15	2,5	0	1,7	1,4
Landquart, Klosters . . . . .	1209	III	29.	11.45	5,2	0	6,3	5,1
Tamina, Vättis-St. Peter . . .	947	III	5.	16.20	5,6	3	11,6	11,0
Rhein, Oberriet . . . . .	424	III	4.	17.45	7,1	4	18,6	12,4
Rhein, St. Margrethen . . . . .	ca. 400	II	26.	16.20	5,6	3	21,8	13,6
Binnenkanal, St. Margrethen	ca. 400	II	26.	16.35	7,4	0	18,4	15,7
Reuß, Andermatt . . . . .	1444	II	14.	18.00	—	—	—	7,0
Göschener Reuß, Abfrutt . . .	1200	II	14.	11.05	—	—	—	4,1
Meienreuß, Husen . . . . .	1179	II	17.	13.20	—	—	—	5,4
Kärstelenbach, Hinterbristen	797	II	18.	11.40	—	—	—	7,4
Seeweren, In der Hebleren . .	ca. 440	II	20.	14.30	—	—	—	15,6
Inn, St. Moritz-Bad . . . . .	1769	IV	22.	17.30	2,7	0	5,9	4,3
Inn, Samaden . . . . .	1723	IV	20.	11.55	4,4	3	4,2	3,3
Chamuerabach, Campovasto .	1700	IV	14.	11.45	3,8	0	28,9	7,7
Inn, Scans . . . . .	1650	IV	15.	7.10	1,5	0	12,7	6,8
Spöl, Zernez . . . . .	1497	IV	15.	13.45	4,8	0	17,6	10,4
Inn, Martinsbruck . . . . .	1036	IV	19.	12.30	6,0	4	11,5	9,4
Rambach, Münster . . . . .	1248	IV	17.	7.20	5,3	4	20,0	11,1

\* Trockenrückstand 308 mg/l

## VII. Über einige Zusammenhänge zwischen dem Mineralgehalt von Winterwässern der Gletscher und der Gesteinszusammensetzung

Von H. Huber und F. de Quervain

### A. Über die Herkunft des Wintergletscherwassers.

Nach *O. Lütschg* und *P. Huber* (6) sind im Gletscherbach am Gletschertor Wasseranteile verschiedenen Ursprungs vereinigt: Es treten dort Teile der Zuflüsse von den Talhängen oberhalb der Gletscher, Teile des subglazialen Quellbaches, ferner durch diese Quellbäche erzeugtes Schmelzwasser, Ablationswasser der Gletscheroberfläche und Schmelzwasser, erzeugt durch die Erdwärme und die Gletscherbewegung, zutage. Wie groß diese einzelnen Teile sind, ist von Fall zu Fall verschieden und mit Sicherheit nicht anzugeben, da wesentliche Quellen unserer Beobachtung entzogen sind. Für den Hochwinter kann man jedoch das oberflächliche Ablationswasser = 0 setzen, und für die Anteile an Schmelzwasser durch die Erdwärme und die Gletscherbewegung ist nach *O. Lütschg* ein recht kleiner Betrag anzunehmen, da nur in den Zungengebieten, wo die Gletscher unter 2000 m herabreichen, die Bodentemperatur  $> 0^{\circ}$  ist und in der Umgebung der Eismassen diese Grenze noch weiter herabgedrückt wird.

Im wesentlichen wird im Wintergletscherbach Quellwasser und durch diese Quellwasser erzeugtes Schmelzwasser zutage treten. Je mehr und je wärmeres subglaziales Quellwasser auftritt, desto größer wird der Anteil an dadurch erzeugtem Schmelzwasser werden. Dies hat höhere Abflußpenden und (bei gleichartigen Quellwässern) geringeren Anteil an gelösten Stoffen zur Folge.

Die Analysen von Bachwässern, die nur oberflächlich Berührung mit Fels und Schutt erfahren haben (zum Beispiel Ofentalbach, Mattmark), haben ergeben, daß durch diesen Kontakt mit dem Gesteinsmaterial nur kleine Mengen von Mineralstoffen in Lösung gehen (Trockenrückstand: 12,9 mg/l). Deshalb werden uns durch die Bestimmung der Trockenrückstände des Gletscherbaches wertvolle Anhaltspunkte für den Anteil an Quellwasser geliefert. Besonders der Vergleich mit den Sommerwässern und die Temperaturmessungen zeigten, daß der Mineralgehalt und oft auch die Temperatur der Wintergletscherwässer verhältnismäßig hoch sind.

### B. Beziehungen zwischen der Wassertemperatur und dem Trockenrückstand.

Da nach *H. Jäckli* und *K. Kleiber* (3) zwischen der Quellwassertemperatur und der Meereshöhe eine ziemlich klare Abhängigkeit besteht, ist es nicht uninteressant, zum Vergleich mit den Gletscherwassertemperaturen die Temperaturen von Quellen der Zentralalpen heranzuziehen. Wie zu erwarten, bemerkt man, daß, verglichen mit der zu erwartenden Quelltemperatur in mittlerer Höhe des Gletscherzungengebietes, die Gletscherwassertemperaturen beträchtlich kleiner sind. Einige Beispiele in Tabelle 24, Seite 92, mögen dies erläutern.

Auch wenn wir in Rechnung stellen, daß die mittleren Wintertemperaturen der Quellen etwas kleiner sind als angenommen (Sommerwerte als Grundlage für *Jäcklis* Diagramme), ergibt sich nur für das Findelengletscher- ( $+ 5,5^{\circ}$ ) und das Fexgletscher-

wasser (+ 0,7 °) eine wesentlich höhere Temperatur als für gleichhoch gelegene Quellwässer. Bei diesen zwei Gletschern dürfte also das Wasser sehr wesentlich durch Quellen beeinflusst sein. Es zeigt sich jedoch andererseits beim Unteren Grindelwaldgletscher, dessen Wasser im Verhältnis zur Höhenlage des Zungengebietes viel zu kalt ist ( $\Delta T = -3,4^\circ$ ), daß bedeutende Mengen Stoffe darin gelöst sein können. Die Möglichkeit ist nicht von der Hand zu weisen, daß in höheren Lagen an den seitlichen Talhängen und selbst im Firngebiet ergiebige und der Höhenlage entsprechend kältere Quellen noch zutage treten. Dann ist auch zu berücksichtigen, daß überall dort, wo Quellwasser längere Zeit unter dem Eis fließt, eine bedeutende Abkühlung stattfindet und deshalb die am Gletschertor gemessenen Wassertemperaturen niedriger sind als die Temperaturen an den subglazialen Quellorten.

2,85 ° = Mittlere Quelltemperatur für Nordexposition und 2000 m Höhe.

0,41 ° = Mittlerer Temperaturgradient für 100 m Höhenunterschied und Quellwasser zwischen 1400 und 2400 m Höhe.

Tabelle 24

Nr.	Gletscher	Mittlere Höhenlage des Zungengebietes	Gletscherwassertemperatur	$\Delta T$
		ca. m ü. M.	° C	° C
8/10	Oberer Grindelwald . . .	2000	1,25	- 1,6
11	Unterer Grindelwald . . .	1700	0,63	- 3,4
14	Hüfi . . . . .	1880	0,65	- 2,7
15	Biferten . . . . .	2300	0,51	- 1,1
19	Gorner . . . . .	2300	0,66	- 1,0
20	Z'Mutt . . . . .	2400	0,07	- 1,1
21	Findelen . . . . .	2560	<b>6,07</b>	+ 5,5
23/24	Schwarzenberg . . . . .	2650	0,07	- 0,1
25/27	Fee . . . . .	2250	0,01	- 1,8
29	Turtmann . . . . .	2450	0,05	- 1,0
31	Ferpècle . . . . .	2300	0,28	- 1,3
30	Arolla . . . . .	2500	0,19	- 0,6
35	Fex . . . . .	2400	1,90	+ 0,7

Trotz diesen temperaturverändernden Einflüssen besteht nun aber doch, generell betrachtet, eine Beziehung zwischen Trockenrückstand und Temperatur. Erwartungsgemäß zeigen die warmen Wässer höhere Gehalte an gelösten Stoffen, jedoch ist die Zunahme bedeutend größer, als der Änderung der Löslichkeit der Mineralarten im betreffenden Temperaturintervall entspricht, und beruht darauf, daß die wärmeren Gletscherwässer vorwiegend aus Gebieten mit Karbonatgesteinen stammen. Die höhere *Temperatur* der harten Gletscherwässer aus Karbonatgesteinsgebieten mag darauf beruhen, daß zufolge der stärkeren Durchklüftung, der meist flachen Lagerung, der Wechsel- und Unterlagerung mit undurchlässigen Gesteinen und der Falten tektonik diese Gebiete besonders quellenreich sind.

Um die Frage zu entscheiden, ob in den Wintergletscherwässern zur Hauptsache Quellwasser vorliegt, müssen aber ergänzende Untersuchungen vorgenommen werden, welche betreffen:

1. die Beziehungen zwischen der Gesteinszusammensetzung und dem Mineralgehalt der Quell- und Gletscherwässer,
2. den Vergleich von Mineralgehalt und Temperatur der Gletscherwässer mit den Eigenschaften benachbarter Quellen und von Grundwasser.

### C. Die Gesteine als Stofflieferanten der Quell- und Gletscherwässer.

Nach abnehmender Löslichkeit geordnet, kommen als Lieferanten für die Quell- und Gletscherwässer der Alpen in Frage:

Tabelle 25

Gesteinsarten	Mineralarten	Löslichkeit mg/l	Ionen	
Haloidgesteine	Kochsalz (Flußspat)	2,63.10 <sup>6</sup> (15)	Na <sup>+</sup> (K) (C <sup>-</sup> )	Cl <sup>-</sup> (F <sup>-</sup> )
Sulfatgesteine	Gips, Anhydrit, Baryt	1,76.10 <sup>3</sup>	Ca <sup>++</sup> (Sr <sup>++</sup> ) Ba <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>''</sup>
Karbonatgesteine	Calcit Dolomit Magnesit	1,3.10 (40 bis 100 in CO <sub>2</sub> -halt. Wasser)	Ca <sup>++</sup> , Mg <sup>++</sup>	(CO <sub>3</sub> <sup>''</sup> ) HCO <sub>3</sub> <sup>'</sup>
(Phosphate)	Apatit (Tricalcium- phosphat)	36	Ca <sup>++</sup>	(PO <sub>4</sub> <sup>'''</sup> )
Silikatgesteine	basische Silikate saure Alk. Silikate Quarz Kalifeldspat	Vorwiegend hydrolytische Zersetzung unter Auswaschung der Alkalien von Ca z. B.: 22,7 mg/l Alkalien gehen bei fortgesetzter Einwirkung in Lösung Trockenrückstand 38,1 mg/l		
	Muskowit	3 bis 5 % der Alkalien gehen bei längerer Einwirkung in Lösung Ionen in Lösung:	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> (Ca <sup>++</sup> )	Kieselsäure Tonerde

Dabei wird bei Vorhandensein leichter löslicher Gesteinsarten und Mineralien der Wasserchemismus wesentlich durch diese beeinflusst, auch wenn sie arealmäßig im Einzugsgebiet der Quelle oder des Gletschers stark zurücktreten, weil die Löslichkeiten von oben nach unten progressiv abnehmen. Wir werden darum auch bei gleichmäßiger Quellenführung und -dichte aller Gesteinsarten keine Proportionalität zwischen Gesteinschemismus und Wasserchemismus erwarten.

Da in den untersuchten Gletscherwässern Cl<sup>-</sup>-Ionen nur in verschwindenden Mengen vorkommen, scheidet die leichtest löslichen Haloidgesteine als Stofflieferanten aus. Zudem sind die in einigen Fällen in großer Menge auftretenden SO<sub>4</sub><sup>''</sup>- und die oft dominierenden (HCO<sub>3</sub>)<sup>'</sup>-Ionen in den Gesteinen ausschließlich an die zweiwertigen Metallatome (vor allem an die Erdalkalien) gebunden. Deshalb gibt uns der Gehalt an Alkalien im Gletscherwasser vorwiegend ein Maß für die Beteiligung der Alkalisilikate und der sauren kristallinen Gesteine bei der Stoffbelieferung. Auf einige Eigentümlichkeiten, die damit zusammenhängen, soll später eingegangen werden (hoher Alkaliengehalt des Albignagletschers).

### D. Die Gesteinsgrenzen und Gesteinszonen als Quellenhorizonte und ihr Einfluß auf den Stoffbestand der Quellwässer.

Die Quellenhorizonte in den Gletschergebieten können verschiedenartiger Natur sein und umfassen:

- |                |   |  |   |
|----------------|---|--|---|
| Schichtquellen | { | 1. Grenzflächen zwischen Lockergesteinen und Fels (Schutt- und Moränenquellen)                           | im allg. zunehmende<br>Beeinflussung des<br>Mineralinhaltes<br>durch die Gesteins-<br>zusammensetzung |
|                |   | 2. Klufflächensysteme innerhalb einheitlicher Gesteinszonen (Kluftquellen)                               |   |
|                |   | 3. Mylonitzonen und Schieferzonen in Kristallingebieten  |   |
|                |   | 4. Grenzflächen zwischen kristallinen Gesteinen und Sedimenthülle (besonders am Rand der Zentralmassive) |   |
|                |   | 5. Verwerfungs- und Synklinalzonen in Bündnerschiefer- und helvetischen Gesteinsserien.                  |   |

In *reinen Kristallingebieten* sind vor allem Schuttquellen, Kluftquellen und an Mylonit- und Ruschelzonen gebundene Quellen von Bedeutung. Das bedeutet nicht, daß die Wanderwege im Gestein stets klein sind. Besonders Kluftquellwasser und Grundmoränenquellwasser kann lange Zeit mit der Gesteinsoberfläche in Kontakt gewesen sein. Auf Grund der geringen Löslichkeit der Silikatgesteine ist aber eine starke Mineralkonzentration nicht zu erwarten.

In den *Sedimenthüllen der Zentralmassive* können im klüftigen Hochgebirgskalk die Schmelz- und Regenwässer oft sehr rasch wandern und nach kurzem Wanderweg als witterungsabhängige Quellen zutage treten. Besonders deutlich sind solche Quellbäche aus unterirdischen Wasserläufen beidseits des Hüfigletschers zu beobachten, und es verwundert nicht, daß das durch sie zum Teil belieferte Hüfigletscherwasser trotz leichter Löslichkeit des Kalkes relativ geringe Mengen Trockensubstanz enthält.

Bei den Quellen, die in den sogenannten *Zwischenbildungen* (Trias-Dogger über dem Kristallin) zutage treten, sind etwas andere Verhältnisse zu erwarten. Einmal verhindern dort die weniger durchlässige Kristallinunterlage und Tonschieferzwischenlagen ein rasches Durchsickern. Dann laufen die Mulden gegen das Massivinnere oft keilförmig aus, und die Trias ist durch den Emporstieg des Massivs längs zahlreichen Dislokationsflächen verschuppt und zerbrochen. Außerdem ist die Rauhacke an der Basis der Trias oft gipshaltig. Alle diese Erscheinungen können eine stärkere Stoffkonzentration in den Quellwässern bewirken.

Ähnliche Verhältnisse liegen in den *Kalkschiefermulden und Triaslamellen* des Penninikums vor. Durch Wechsellagerung mit Tonschiefern wird auch hier ein rasches Durchsickern oft verhindert, und die Quellwässer können, besonders in Gebieten starker Faltung und flacher Schichtlage (Zermatt, Fextal) lange mit den leichter löslichen Gesteinen in Kontakt bleiben. Darum ist es nicht verwunderlich, daß wir gerade in solchen Gebieten Gletscherwässer mit sehr hohen Mineralgehalten finden (vergleiche Unterer Grindelwaldgletscher, Kanderfirn, Findelengletscher).

## E. Die geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der untersuchten Gletscherabflüsse.

### Allgemeines.

In den folgenden Kartenskizzen 1 : 150 000 (Fig. 1 bis 20) sind die wichtigsten Gesteinsarten dargestellt, welche am Aufbau des Untergrundes im Einzugsgebiet der Gletscherwässer beteiligt sind. Wir können daraus wohl die Bedeutung der einzelnen Gesteinsgruppen erkennen, jedoch sind zur Umschreibung von Baustil und Gesteinszusammensetzung einige zusätzliche Bemerkungen notwendig.

Wir können auf Grund der Tektonik und petrographischen Zusammensetzung einige wesentlich verschiedene Typen auseinanderhalten;

1. Gletscher in den kristallinen Gesteinen der Zentralmassive, Nrn. 1, 2, 4, 5, 16, 17, 18, 28\*).
2. Gletscher in den Randgebieten der Zentralmassive mit Kristallin- und Karbonatgesteinsgrundlage, Nrn. 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15.
3. Gletscher in den penninischen Schiefererien mit basischen Einlagerungen im Wallis und Graubünden, Nrn. 19, (20), 21, 25/27, 29, 32, 35.
4. Gletscher in den kristallinen Deckenkernen des Wallis und Graubündens, Nrn. 23/24, (20), 30, 31, 36, 37, 38.
5. Gletscher in den jungen Graniten des Bergeller Massivs, Nrn. 33, 34.

\*) Gleiche Nummern wie in den Tabellen 3-6.

#### 1. Die Gletscher in den kristallinen Gesteinen des Aaremassivs.

Dieser Gruppe sind zuzuordnen:

		Tab.-Nr.	Fig.-Nr.	
a) Im Stromgebiet des Rheins:	Oberaargletscher	1	} 1	
	Unteraargletscher	2		
	Gauligletscher	4		2
	Triftgletscher	5		3
b) Im Stromgebiet der Rhone:	Rhonegletscher	16	4	
	Fieschergletscher	17	5	
	Aletschgletscher	18	6	
	Lang-Jägi-Gletscher	28	7	

**Geologische Kennzeichen:** Steile Schichtstellung bei einheitlichem E-W- bis NE-SW-Streichen. Die Gesteine sind zum Teil polymetamorph und während der alpinen Gebirgsbildung vorwiegend destruktiv umgewandelt worden (Kataklyse). Saure und intermediäre Eruptiv- und Mischgesteine überwiegen. In sie sind Zonen mechanisch weniger widerstandsfähiger metamorpher Paragesteine und von zähen Amphiboliten eingeschaltet. Die Gesteine sind durch ausschließlich silikatischen meso-epi-Mineralbestand ausgezeichnet und zeigen nur geringe Löslichkeit. Sekundäre Calcitbildung aus den Kalksilikaten (Plagioklas) kann bei stärkerer Metamorphose und Verwitterung überhandnehmen und dadurch zu vermehrter Stoffbelieferung der Lösungen Anlaß geben. Dies um so mehr, als die Quellenhorizonte oft an Mylonitzonen, Verwitterungsschutt und (weniger häufig) an Kluftsysteme mit stärkerer Umwandlung der Nebengesteine gebunden sind.

Die Gletscherwässer zeichnen sich aus durch relativ geringe Mengen Trockenrückstand (20 bis 50 mg/l), durch ziemlich bedeutenden Alkaligehalt und manchmal durch reichliches Auftreten von  $\text{SO}_4^{''}$ -Ionen neben Hydrokarbonat-Ionen (vor allem Fieschergletscher [17]: 9,9 mg  $\text{SO}_4^{''}$ , Aletschgletscher [18]: 16,95 mg  $\text{SO}_4^{''}$ , Unteraargletscher [2]: 8,7 mg  $\text{SO}_4^{''}$ , Triftgletscher [5]: 10,3 mg  $\text{SO}_4^{''}$ ). Die Quelle für diesen  $\text{SO}_4^{''}$ -Gehalt dürfte hier durch den Verwitterungsprozeß von sulfidischen Erzen (Pyrit) gegeben sein, welche vor allem den Amphiboliten beigemischt sein können (Amphibolitareale der sulfatreichen Gletscher [17, 18, 2, 5]: 8 bis 20 ‰ des Einzugsgebietes der Gletscher).

Abgesehen von diesen Schwankungen im  $\text{SO}_4^{''}$ - $\text{HCO}_3'$ -Verhältnis zeigen die Wässer aber große Ähnlichkeiten. Auch das Alkalienverhältnis schwankt nur unbedeutend und bleibt im Rahmen der Werte für die Gesteinszusammensetzungen.

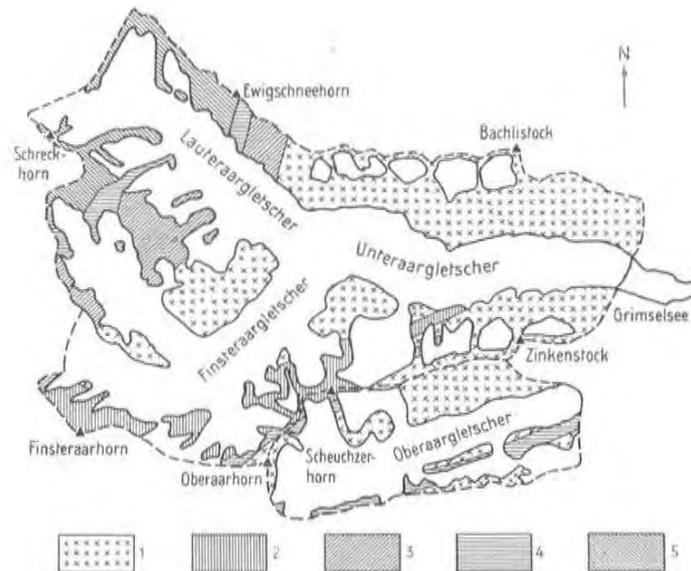


Fig. 1 Unter- und Oberaargletscher (Nrn. 1-3 der Tabellen)

- 1 Granite, mittel bis grobkörnig, massig bis leicht geschiefert, quarzreich, stellenweise in porphyrische dunklere Granite bis Augengneise übergehend. – Hauptminerale: Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit.
- 2 Amphibolite, oft von aplitischen Adern und Gängen durchzogen, stellenweise wechsellagernd mit biotitreichen Gneisen. – Hauptminerale: Hornblende, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Kalifeldspäte.
- 3 Biotitgneise- und -hornfelse, Biotit-Serizit-Gneise, oft von Injektionslagen und Adern durchsetzt. Einzelne Amphibolitlagen. – Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Serizit, Chlorit, Kalifeldspäte.
- 4 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Gneise. Spärlich hornblendereiche Einlagerungen. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit, Biotit, saure Plagioklase.
- 5 Feldspatreiche Biotitgneise, Biotit-Serizit-Gneise. – Hauptminerale: Kalifeldspäte, Quarz, Biotit, Serizit, saure Plagioklase.

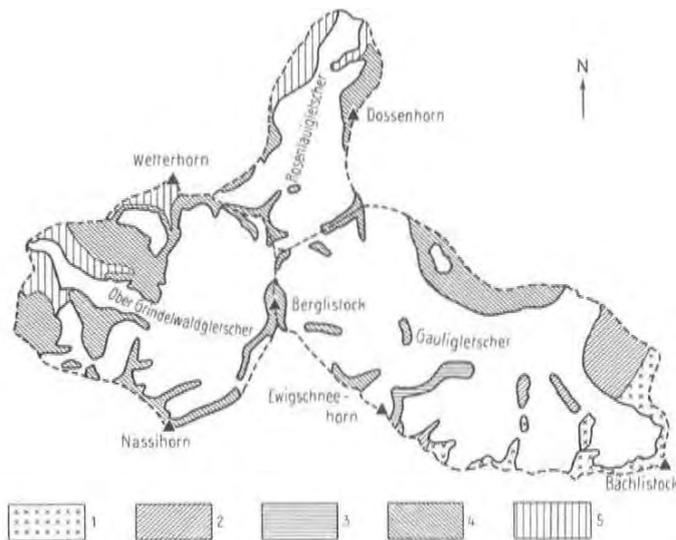


Fig. 2 Oberer Grindelwaldgletscher - Rosenlaugletscher - Gauligletscher (Nrn. 4, 6-10)

- 1 Granit, mittel bis grobkörnig, massig bis geschiefert, biotitarm, mit Einlagerungen basischer Gesteine. - Hauptminerale: Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Quarz, Biotit.
- 2 Biotitgneise, Biotithornfelse, Biotit-Chlorit-Serizit-Gneise mit Einlagerungen von Amphiboliten, oft mit Injektionsaderungen. - Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Chlorit, Serizit, Kalifeldspäte, Hornblenden.
- 3 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Schiefer und spärliche Einlagerungen hornblendeführender Gesteine. - Hauptminerale: Serizit, Chlorit, Quarz, Feldspäte, Biotit.
- 4 Biotitgranite, massig bis geschiefert, übergehend in aplitische Granite, feldspatreiche Biotitgneise, Biotit-Serizit-Gneise. Einlagerungen von Biotithornfelsen, Amphiboliten, Quarzporphyren, vereinzelte schmale Kalkstein-Dolomitzüge (Keile). - Hauptminerale: Orthoklas, Mikroklin, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Serizit, Cordierit (Pinit).
- 5 Kalksteine (meist Malm), ganz untergeordnet Tonschiefer, Mergelschiefer, Eisenoolithe (Dogger) und dolomitische Gesteine (Trias).

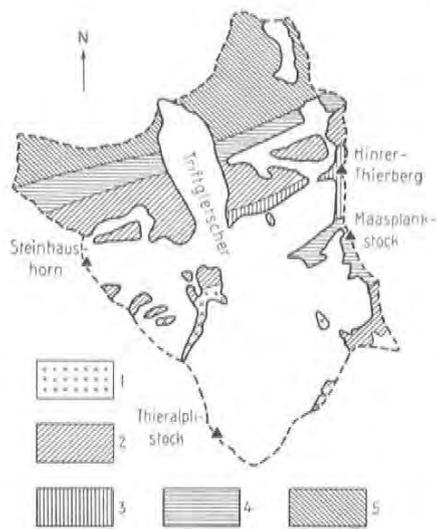


Fig. 3 Triftgletscher (Nr. 5)

- 1 Granit, mittel bis grobkörnig, massig oder leicht geschiefert, quarzreich (Aargranit). – Hauptminerale: Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit.
- 2 Biotitgneise und -hornfelse, Serizit-Biotit-Gneise und Schiefer, oft injiziert und mit Zwischenlagerungen von Amphiboliten. – Hauptminerale: Biotit, saure Plagioklase, Quarz, Serizit, Chlorit, Kalifeldspäte, Hornblende.
- 3 Amphibolite, oft durchsetzt von aplitischen Lagern und Gängen, Zwischenschaltungen von biotitreichen Gneisen. – Hauptminerale: Hornblende, Plagioklase, Quarz, Biotit, Kalifeldspat.
- 4 Serizitreiche Gneise und Schiefer, Serizit-Chlorit-Schiefer, Serizit-Biotit-Schiefer, spärliche Einlagerungen von Amphiboliten. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit, Biotit, saure Plagioklase.
- 5 Feldspatreiche Biotitgneise, Biotit-Serizit-Gneise. Hauptminerale: Kalifeldspäte, saure Plagioklase, Biotit, Quarz, Serizit, Chlorit.

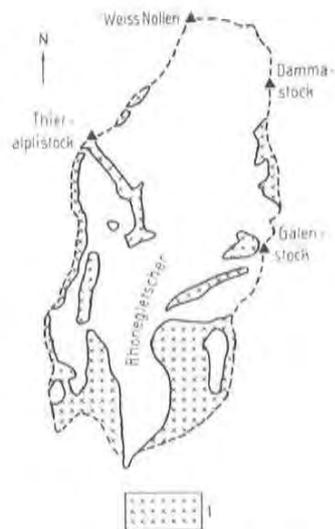


Fig. 4 Rhonegletscher (Nr. 16)

- 1 Granit, quarzreich, teilweise etwas geschiefert. – Hauptminerale: Mikroklinperthit, Albitoligoklas, Quarz, Orthoklas, Biotit, Serizit.

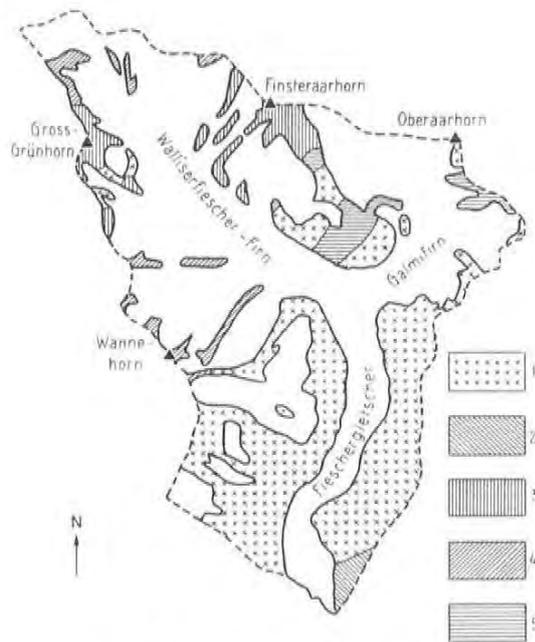


Fig. 5 Fieschergletscher (Nr. 17)

- 1 Granit, mittel bis grobkörnig, massig oder leicht geschiefert, quarzreich (südlicher Aargranit). – Hauptminerale: Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit.
- 2 Feldspatreiche Gneise der südlichen Zone. – Hauptminerale: Kalifeldspäte, saure Plagioklase, Quarz, Biotit.
- 3 Amphibolite, oft von aplitischen Adern und Gängen durchzogen, stellenweise wechsellagernd mit biotitreichen Gneisen. – Hauptminerale: Hornblende, Plagioklase, Quarz, Biotit, Kalifeldspäte.
- 4 Biotitgneise und -hornfelse, Biotit-Serizit-Gneise, oft von Injektionslagen und Adern durchsetzt. Einzelne Amphibolitlagen. – Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Serizit, Chlorit, Kalifeldspäte.
- 5 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Gneise. Spärlich hornblendereiche Einlagerungen. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit, Biotit, saure Plagioklase.



Fig. 7 Langgletscher (Nr. 28)

- 1 Biotitgneise und Hornfelse, oft injiziert mit Einlagerungen von Amphiboliten und injizierten Dioriten, ferner Granitporphyren und serizitreichen Schiefen. – Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Mikroklin, Hornblende, Serizit.
- 2 Serizitgneise, Serizitschiefer, Serizit-Chlorit-Schiefer mit vereinzelt Einlagerungen von Quarzporphyren und hornblendereichen Gesteinen. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit, Albit.
- 3 Granit, mittelkörnig, massig (Gasterngranit). – Hauptminerale: Orthoklas, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit, Serizit.

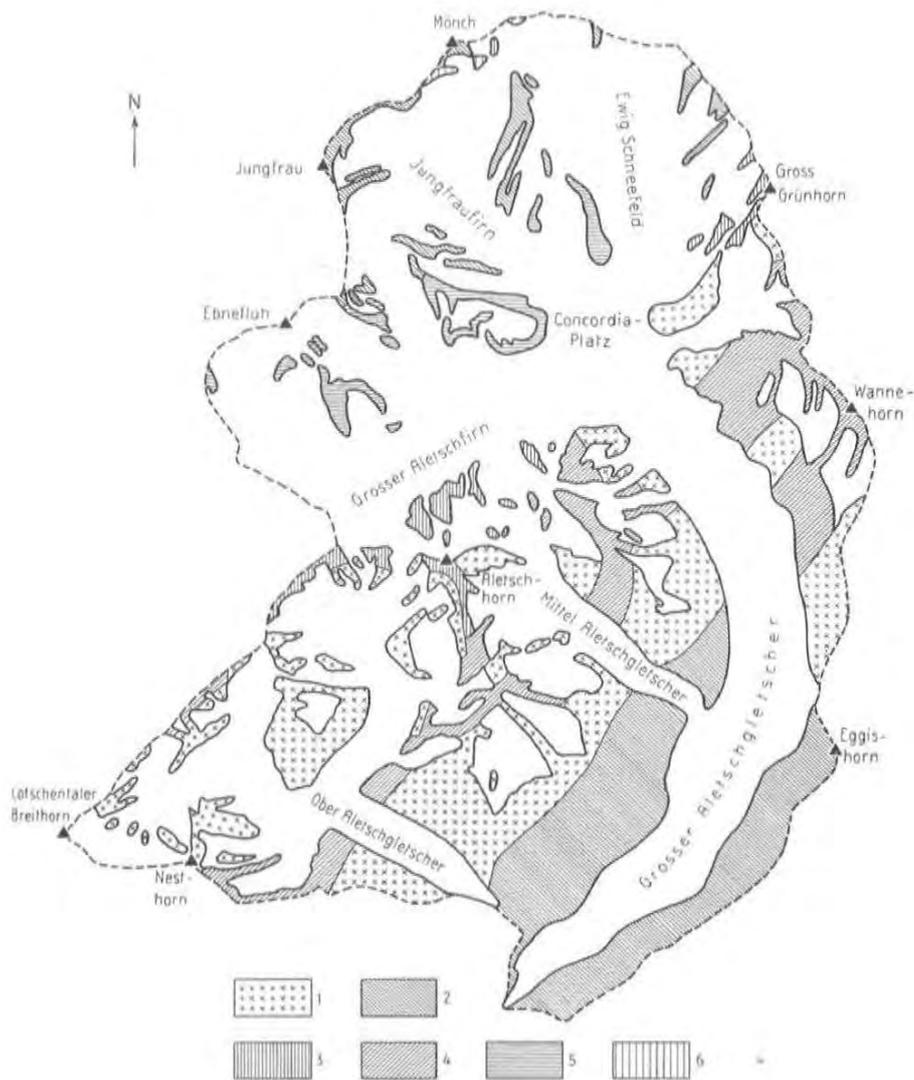


Fig. 6 **Grosser Aletschgletscher** (Nr. 18)

- 1 Granite, mittel bis grobkörnig, massig oder leicht geschiefert, quarzreich (Aaregranit). – Hauptminerale: Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit.
- 2 Feldspatreiche Gneise, vorwiegend grobe Augengneise, mit Einlagerungen von biotitreichen Gneisen und Schiefen und hornblendereichen Gesteinen. Stark verschieferte, serizitreiche Zonen verbreitet. – Hauptminerale: Kalifeldspäte, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Serizit.
- 3 Amphibolite, oft von aplitischen Adern und Gängen durchzogen, übergehend in Diorite und Quarzdiorite, wechsellagernd mit biotitreichen Gneisen. – Hauptminerale: Hornblende, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Kalifeldspäte.
- 4 Biotitgneise und Hornfelse, Serizit-Biotit-Gneise, oft von Injektionslagen und Adern durchsetzt. Einzelne Amphibolilagen. – Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Serizit, Chlorit, Kalifeldspäte.
- 5 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Gneise. Spärlich hornblendereiche Einlagerungen. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit, Biotit, saure Plagioklase.
- 6 Kalksteine, Mergel, Tonschiefer. – Hauptminerale: Kalkspat.

## 2. Die Gletscher in den Randgebieten des Aaremassivs.

Hierher gehören:

	Tab.-Nr.	Fig.-Nr.
Rosenlauigletscher	6/7	} 2
Oberer Grindelwaldgletscher	8/9	
Unterer Grindelwaldgletscher	11	8
Kanderfirn	12	9
Lötschenberggletscher	13	—
Hüfigletscher	14	10
Bifertengletscher	15	11

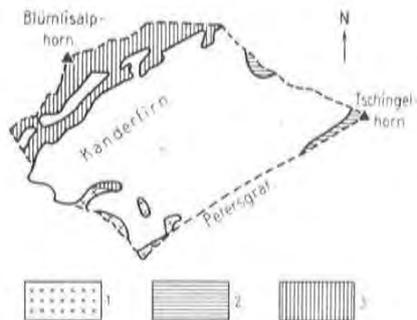
alle im Stromgebiet des Rheins.

**Geologische Kennzeichen:** Wesentlich sind die Vorkommen von jungen, diskordant zum steilstehenden Kristallin gelagerten Karbonatgesteinen, insbesondere von Hochgebirgskalk und den zum Teil rauhwacke- (und gips-) haltigen Zwischenbildungen. Sie sind meist in keilförmigen Mulden tief in das in Teillappen hochgeschobene Kristallin eingefaltet und bestimmen den Chemismus der Gletscherwässer, auch wenn sie arealmäßig nicht besonders hervortreten. Dort, wo Gips fehlt (Hüfi-, Biferten-, Rosenlaui-, Oberer Grindelwaldgletscher), schwanken im Gletscherwasser die Mengen Trockenrückstand zwischen 70 und 120 mg/l, steigen jedoch in gipsführenden Gebieten (Unterer Grindelwaldgletscher, Kanderfirn) auf 180 und über 300 mg/l an.

Die Alkalien stammen nach wie vor aus den Alkalialumosilikaten der kristallinen Gesteine und treten im Verhältnis zu den Erdalkalien stark zurück. Auch absolut mengenmäßig sind sie entsprechend dem kleineren Areal kristalliner Gesteine etwas niedriger als in den Gletscherwässern im Innern des Massivs.

Die Grenzzone Kristallin-Sedimentbedeckung als bevorzugter Quellhorizont trägt wohl wesentlich zur Verstärkung der Gegensätze zwischen 1. und 2. bei und schafft vor allem am Kanderfirn, wo die wassersammelnden Triassynklinale dem Gletscherboden entlangstreichen, besondere Verhältnisse.

Die relative Menge von Karbonatgesteinen im Gletscherareal übt keinen großen Einfluß auf den Stoffbestand der Gletscherwässer aus, zeigen doch gerade die ausgesprochenen Kalkgebiete des Hüfi- und Bifertengletschers eher kleine Mengen gelöster Stoffe.



- 1 Massiger Granit (Gasterngranit). – Hauptminerale: Orthoklas, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Chlorit.
- 2 Serizit-Chlorit-Schiefer. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, Chlorit.
- 3 Kalksteine, Mergelschiefer, eisenschüssige Tonschiefer, Sandsteine (Dogger und Malm), wenig Dolomit (Trias) – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Serizit, Eisenhydroxyde.

Fig. 9 Kanderfirn (Nr. 12)

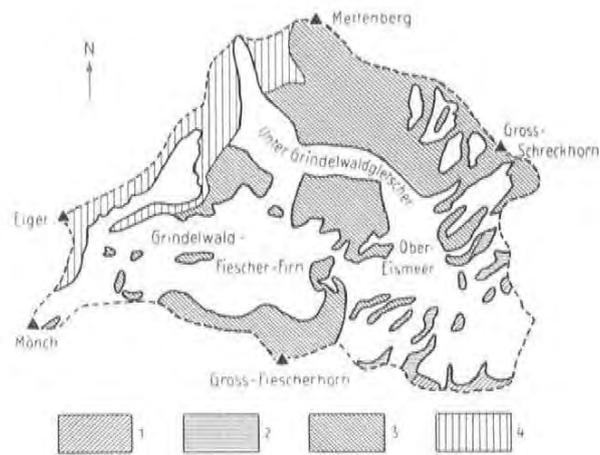


Fig. 8 Unterer Grindelwaldgletscher (Nr. 11)

- 1 Biotitgneise, Biotithornfelse, Biotit-Chlorit-Serizit-Gneise mit Einlagerungen von Amphiboliten, oft mit Injektionsaderung. – Hauptminerale: Biotit, Quarz, saure Plagioklase, Chlorit, Serizit, Kalifeldspäte, Hornblende.
- 2 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Gneise mit spärlichen Einlagerungen von hornblendeführenden Gesteinen. – Hauptminerale: Serizit, Chlorit, Quarz, Feldspäte, Biotit.
- 3 Biotitgranite, massig bis geschiefert, übergehend in aplitische Granite, feldspatreiche Biotitgneise, Biotit-Serizit-Gneise. Einlagerungen von Biotithornfelsen, Amphiboliten, Quarzporphyren. Vereinzelt schmale Kalkstein-Dolomitzüge (Keile). – Hauptminerale: Orthoklas, Mikroklin, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Serizit, Cordierit (Pinit).
- 4 Kalksteine (meist Malm), ganz untergeordnet Tonschiefer, Mergelschiefer, Eisenoolithe (Dogger) und dolomitische Gesteine (Trias).

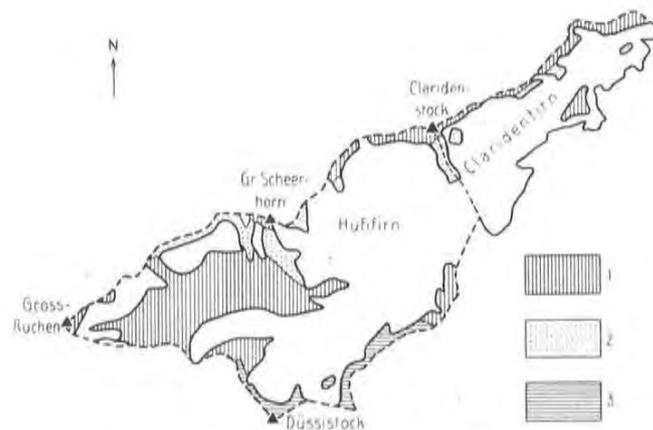


Fig. 10 Hülfi-Claridenfirn (Nr. 14)

- 1 Kalksteine (Malm, Kreide), untergeordnet Kieselkalke, Mergelkalke, Kalkschiefer, kalkige Sandsteine, selten Dolomite (Trias). – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Tonminerale, Serizit.
- 2 Taveyannazsandsteine. – Hauptminerale: Saure Plagioklase, Chlorit, Quarz, Augit, Hornblenden, Kalkspat, Kalifeldspäte.
- 3 Serizit-Chlorit-Gneise und -Schiefer, Serizit-Biotit-Gneise mit spärlichen hornblendereichen Einlagerungen. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, saure Plagioklase, Chlorit.

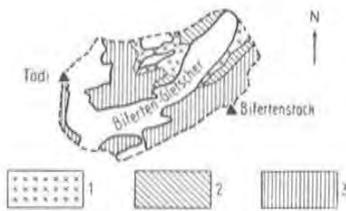


Fig. 11 Bifertengletscher (Nr. 15)

- 1 Granite, fein bis grobkörnig, meist massig, zonenweise geschiefert (Tödigranit). – Hauptminerale: Kalifeldspat (Mikroklin), Albit-Oligoklas, Quarz, Biotit, Chlorit, Serizit.
- 2 Verschiedenartige Paragneise und Quarzite (Karbon und Altkristallin). – Hauptminerale: Quarz, Serizit, Biotit, Chlorit, Feldspäte.
- 3 Kalksteine vorwiegend, untergeordnet Dolomite, Mergelschiefer, Sandsteine. – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Dolomit.

### 3. Die Gletscher in den penninischen Schieferserien und Ophiolithen im Wallis und in Graubünden.

a) Im Stromgebiet der Rhone:

	Tab.-Nr.	Fig.-Nr.
Gornergletscher	19	12
Z'Muttgletscher	20	17
Findelengletscher	21/22	12
Feeegletscher	25–27	13
Turtmanngletscher	29	14
Corbassièregletscher	32	15

b) Im Stromgebiet der Donau (Inn): Fexgletscher

35 —

**Geologische Kennzeichen:** Im Gegensatz zu den Zentralmassiven zeigen diese Gebiete meist flache oder nur wenig geneigte Lage der Schichten und der kristallinen Deckenkerne. Lokal kann allerdings auch steile Schichtstellung eintreten, besonders an den Stirnübergängen der Decken oder an Digitationen und Rückfaltungen. Daneben wird die Lagerung gerade in den Gebieten starker Vergletscherung oft durch ein bedeutendes Axialgefälle modifiziert. In den Gebieten etwas geneigter Schichtstellung folgt der Verlauf der Gletscherzungen oft den tektonisch bedingten Furchen zwischen Schiefen und Gneis- oder Grünsteinsmassen. Dies trifft zum Beispiel für die isoklinalfallenden Zungentäler des Gorner-, Findelen-, Turtmann-, Allalin-, Teile des Feeegletschers und des Fexgletschers zu. Der Z'Muttgletscher, der nur im Zungengebiet die penninische Schieferzone berührt, durchbricht die flach gelagerte Zermatter Schuppenzone und wurzelt mit seinem Firnggebiet im Kristallin der Dentblanche-Decke. Darum zeigt er etwas andere Verhältnisse als die Gletscher in Gebieten mit vorwiegend Schiefen und Kalken, insbesondere einen etwas kleineren Trockenrückstand. Beim Corbassièregletscher bedingt der rückwärts gefaltete Fächerbau des Bernhardkristallins im Firnggebiet flache Lagerung der Bündnerschiefer- und Triaslamellen; im Zungengebiet sind aber die Casannaschiefer, Quarzite und Paragneise steil gestellt und streichen quer zum Zungenbecken.

Petrographisch sind die Muldenzonen im Bereich dieser Gletscher sehr mannigfaltig zusammengesetzt. Den Schistes-lustrés-Serien von tonig-kalkig-sandiger Zusammensetzung sind Bänke reinerer kristalliner Kalke, von Quarziten und von Triasgesteinen primär-stratigraphisch und tektonisch eingelagert. In wechselnden Mengen, nach Süden zu meist sehr stark übernehmend, sind Lager und Linsen epimetamorpher Ophiolithe, vor allem von Prasiniten, Saussuritgabbros und Serpentin eingeschaltet. Die Trias kann, besonders im Hochpenninikum (Umgebung von Zermatt, Fexal), sehr mächtig werden und neben Dolomiten reichlich graue Kalke führen. Auch Gipslinsen sind hin und wieder anzutreffen. Es sind vor allem diese Triasgesteine und die Kalkeinlagerungen in den Bündnerschiefern, welche die Gletscherwässer mit Stoffen beliefern.

Die wechselnde und meist flache Lagerung und die komplizierte Tektonik dieser verschuppten Schieferzonen verunmöglichen es in vielen Fällen über den Verlauf der Gesteinsgrenzen unter dem Gletscher eine sichere Prognose zu stellen. Deshalb können auch die Gesteinsareale nicht mit der Genauigkeit abgegrenzt und zur Kennzeichnung der Arealzusammensetzung ausgemessen werden, wie es in den Zentralmassiven und im Kristallin der Deckenkerne möglich ist.

Erwartungsgemäß zeigen die Gletscherwässer aus diesen Gebieten höhere Gehalte an Trockenrückstand als diejenigen aus den Kristallingebieten. Abgesehen vom Findelengletscher, der durch starke Mineralquellen nahe am Gletschertor sehr stark beeinflusst war, sind die Werte ziemlich ausgeglichen und liegen zwischen 75 und 100 mg/l.

Der Einfluß der ophiolithischen basischen Gesteine auf den Stoffbestand, insbesondere den Mg-Gehalt, macht sich nicht stark bemerkbar. Dagegen beobachtet man dort, wo reichlich Dolomite in der Trias auftreten (Turtmanngletscher [29], Corbassièregletscher [32], Fexgletscher [35]), sofort einen Anstieg des Mg/Ca-Verhältnisses.

Gipsreiches Wasser liegt nur im Findelengletscherabfluß vor und im Abfluß eines Teils des Fexgletschers, der ebenfalls einen ziemlich hohen Trockenrückstand (131 mg/l) aufweist.

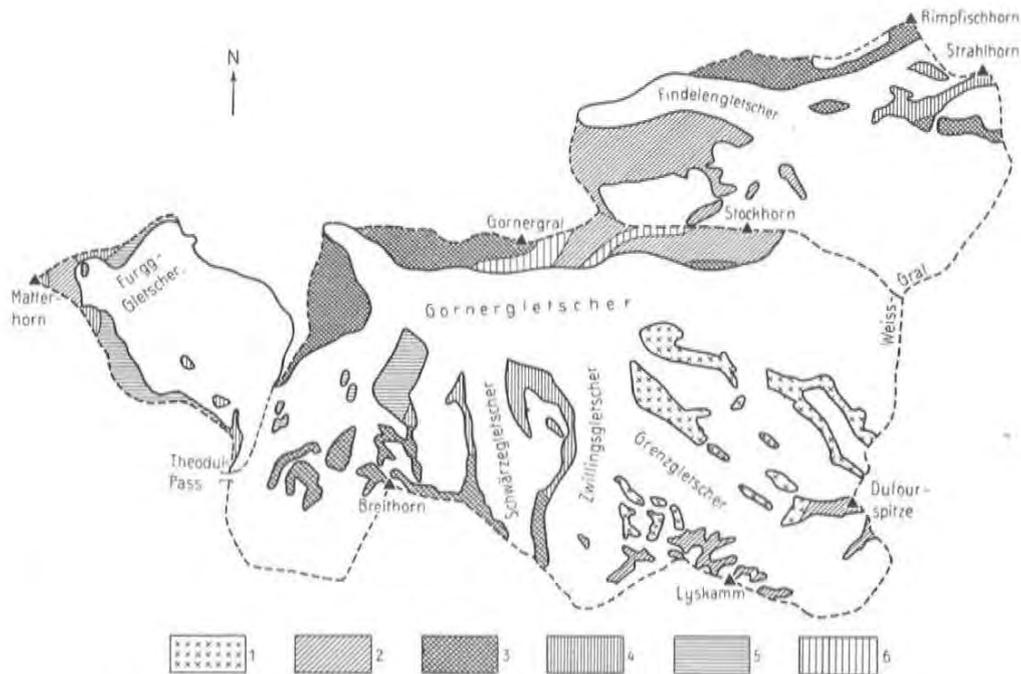
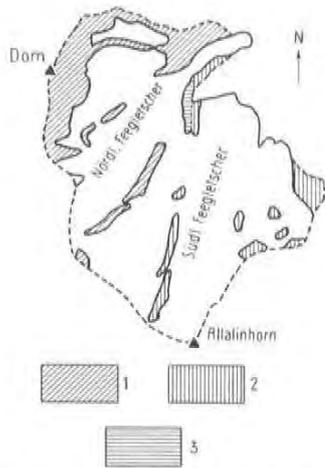


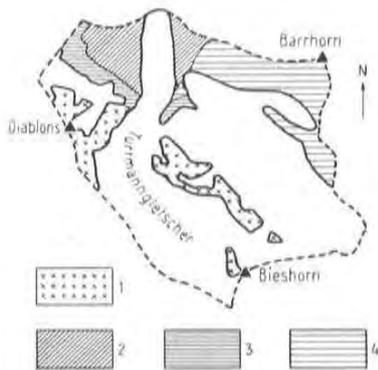
Fig. 12 Findelengletscher - Gornergletscher - Furgg-Gletscher (Nrn. 19, 21, 22)

- 1 Feldspatreiche Gneise (Augengneise), zum Teil massig, granitisch. - Hauptminerale: Kalifeldspäte, saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Muskowit.
- 2 Muskowitgneise, Zweiglimmergneise und -schiefer, Gneisquarzite. - Hauptminerale: Muskowit, Biotit, Quarz, Albit.
- 3 Serpentine. - Hauptminerale: Antigorit, Pyroxen, Olivin, Magnetit.
- 4 Prasinite, Amphibolite, vereinzelt Gabbros. - Hauptminerale: Chlorit, Strahlstein, Epidot, Albit, Pyroxen.
- 5 Kalkglimmerschiefer, Sandmarmore, vereinzelt mit Einlagerungen von Grünschiefern und Dolomiten. - Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Serizit.
- 6 Dolomitmarmore, Kalkmarmore mit Zwischenlagerungen von Kalkschiefern. - Hauptminerale: Kalkspat, Dolomitspat.



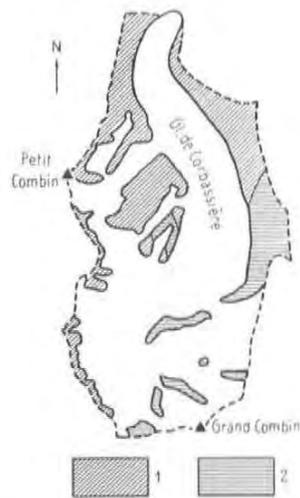
- 1 Muskowitgneise und -schiefer, zum Teil Zweiglimmerschiefer. – Hauptminerale: Muskowit, Quarz, Biotit, Albit.
- 2 Amphibolite und Grünschiefer. – Hauptminerale: Hornblende, Epidot, Albit, Chlorit, Strahlstein.
- 3 Kalkglimmerschiefer. – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Serizit.

Fig. 13 Feegletscher (Nrn. 25–27)



- 1 Phengit-Alkali-Feldspat-Gneise, Arollagneise, mit Übergängen in Granite und Granodiorite. – Hauptminerale: Saure Plagioklase, Mikroklin, Quarz, Serizit, Phengit.
- 2 Serizit-Chlorit-Quarzite, Serizit-Chlorit-Albit-Schiefer mit Einlagerungen von Amphiboliten. – Hauptminerale: Quarz, Serizit, Chlorit, Albit, Hornblende.
- 3 Dolomite, Kalkmarmore mit Einlagerungen von Kalkschiefern und Quarziten. – Hauptminerale: Dolomit, Kalkspat, Quarz.
- 4 Kalkglimmerschiefer mit Einschaltungen von Dolomiten und Grünschiefern. – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Serizit, Dolomit, Chlorit, Albit.

Fig. 14 Turtmannletscher (Nr. 29)



- 1 Serizit-Chlorit-Albit-Schiefer mit Einlagerungen von Quarziten, karbonatführenden Schiefen und verschiedenartigen Gesteinen mit Hornblende, Epidot, Glaukophan, Granat.
- 2 Kalkglimmerschiefer mit Zwischenschaltungen von Dolomit- und Kalkmarmoren.

Fig. 15 Glacier de Corbassière  
(Nr. 32)

Der außerordentlich hohe Mineralgehalt im Wasser des Findelengletschers gab Anlaß, die Verhältnisse auf dem inzwischen freigeschmolzenen Gletscheruntergrund im Sommer 1945 erneut zu überprüfen. Dabei zeigte es sich, daß am Ort der Probenahme von 1920 eine stark mineralhaltige Quelle zutage tritt.

Dieser Quellbach von 1500 bis 2500 min/l setzt auf den Gesteinen im Bachbett eine dicke Kruste von  $\text{CaCO}_3$  ab, welche durch die Assimilationstätigkeit von Kieselalgen und Moosen zur Ausscheidung gelangt.

Das Bett des Gletscherbaches hat sich im Verlauf von 25 Jahren um etwa 50 m nach Norden verlagert, denn die nördliche Seitenmoräne des Gletschers wird gegenwärtig anerodiert, und die Vegetation zwischen dem Austritt des Mineralquellbaches am Gletscherende 1920 bis 1925 und dem heutigen Bachbett ist stark zurückgeblieben. Die Gletscherzunge ist seit 1925 pro Jahr im Mittel um etwa 25 m zurückgewichen, und ihr Ende liegt heute (1945) etwa 500 m oberhalb des Quellaustritts. Der Quellaustritt, der die Wasserprobe von 1920 so stark beeinflusste, liegt am ehemaligen Südrand des Gletschers, dort, wo die Seitenmoräne auf der Grundmoräne aufsitzt. Trotzdem sie im Schutt zutage tritt, handelt es sich wahrscheinlich um eine Schichtquelle mit Einzugsgebiet weiter südlich, im Gebiet des Ritzengrates, welche sich längs Rauhwackeschichten an Sulfaten und Karbonaten anreichert. Wenig westlich vom Quellaustritt ist ein kleiner Rauhwackeaufschluß zu beobachten.

Es ist sehr wahrscheinlich die Wasserprobe von 1920 stark durch diese Quelle beeinflusst gewesen, ja es ist sogar möglich, daß sie aus dem Quellbach selbst stammte. Dadurch sind die stark abweichenden Verhältnisse des Findelengletschers verständlich.

#### 4. Die Gletscher in den kristallinen Deckenkernen des Wallis und Graubündens.

Hier sind unterzubringen:

		Tab.-Nr.	Fig.-Nr.
a) Im Stromgebiet der Rhone:	Allalingletscher	} 23/24	16
	Schwarzenberggletscher		
	Z'Muttgletscher	20	} 17
	Ferpèclegletscher	31	
	Arollagletscher	30	18
b) Im Stromgebiet der Donau:	Morteratschgletscher	37/38	} 19
	Cambrenagletscher	36	

**Geologische Kennzeichen:** Die kristallinen Gesteine der Dentblanche-Decke, des Monte Rosa und der Bernina, die diese Gletscher tragen, sind zum großen Teil intermediäre und saure, wenig metamorphisierte Eruptivgesteine von wechselnd steiler Lagerung. Paragesteinsserien mit alten Marmoren, Tonerdesilikatgneisen und Glimmerschiefern haben nur untergeordnete Bedeutung. Im Z'Mutt- und Ferpèclegletscher bilden sie als Valpellineserie im Firngebiet eine steilstehende Schieferzone. Etwas größere Verbreitung zeigen flach westwärts einfallende, glimmerreiche Granat- und Muskowitparagneise im Gebiet des Schwarzenberggletschers. Ähnliche Verhältnisse mit östlichem Axialfallen und Wechsellagerung mit Quarzporphyren zeigt der Cambrenagletscher. Im Dentblanche- und Berninakristallin, also in den Einzugsgebieten der Z'Mutt-, Ferpècle-, Arolla-, Morteratschgletscher herrschen dann neben den Alkalifeldspatgneisen und Alkaligraniten wenig metamorphe monzonitische und dioritische Gesteine vor.

Man sollte also auf Grund der Gesteinszusammensetzung erwarten, daß der Mineralgehalt der Gletscherwässer eher klein ist und ähnlich wie im Kristallin des Aarmassivs die Alkalien eine etwas größere Bedeutung erlangen. Das trifft besonders für die Berninagletscher zu. Dagegen zeigen die Gletscherwässer des Wallis zum Teil ziemlich hohe Gehalte an gelösten Stoffen (49 bis 78 mg/l) und sind, wie üblich, um so kalkreicher, je mehr Trockenrückstand sie enthalten. Im übrigen ist bei mittleren Gehalten an gelösten Stoffen das Alk/Ca-Verhältnis durchaus mit den im Kristallin des Aarmassivs gefundenen Werten vergleichbar (siehe Fig. 22).

Der Ferpèclegletscher, der etwas aus dem Rahmen fällt, zeichnet sich durch einen relativ hohen Sulfatgehalt aus (56 % Sulfate), ferner durch einen für Kristallingebiete abnormal hohen Trockenrückstand (78 mg/l). Eine Ursache für dieses besondere Verhalten ist auf Grund der geologisch-petrographischen Verhältnisse nicht zu ersehen. Es ist möglich, daß durch Zersetzung von in den Arollagneisen und Gabbros eingelagerten sulfidischen Erzen Schwefelsäure und Gips gebildet und in das Gletscherwasser geliefert wurden, jedoch kann dies ohne genaue Untersuchung der Detailgeologie und ohne Kenntnis der Verhältnisse im Gletscheruntergrund nur vermutet werden.



Fig. 16

Allalingletscher – Schwarzenberggletscher  
(Nrn. 23, 24, 40)

- 1 Muskowitgneise, Muskowitquarzite, Albitglimmerschiefer, Zweiglimmerauggneise. Hauptminerale: Quarz, Orthoklas, Mikroklinperthit, saure Plagioklase, Muskowit, Biotit.
- 2 Serpentine. – Hauptminerale: Antigorit, Pyroxen, Olivin, Magnetit.
- 3 Gabbros, massig bis stark geschiefert, unverändert bis stark metamorph. – Hauptminerale: basischer Plagioklas (oft stark in zoisitreichen Saussurit umgewandelt), Olivin (teils frisch, teils in Serpentin, Talk, Granat umgewandelt), Diallag, Smaragdit, Grammatit.
- 4 Dolomite, Kalkglimmerschiefer. – Hauptminerale: Dolomitpat, Kalkpat, Serizit, Quarz.

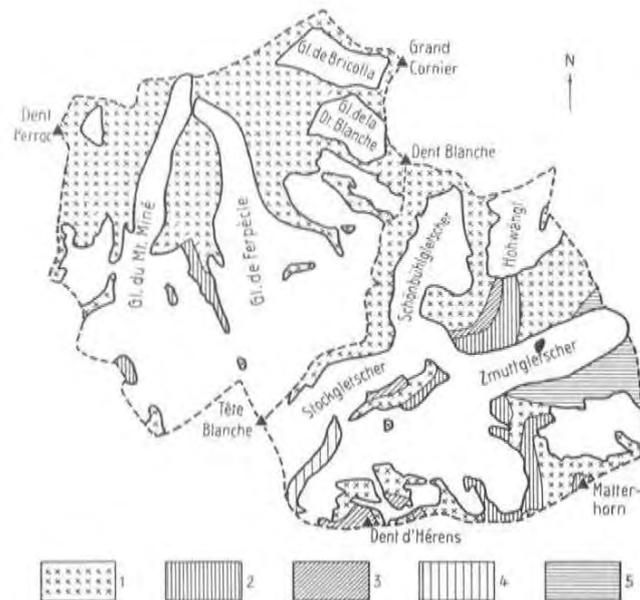


Fig. 17 **Glacier de Ferpèche et Glacier du Mt. Miné – Z'Muttgletscher** (Nrn. 20, 31)

- 1 Granite und Granodiorite mit aplitischen Einlagerungen, übergehend in ihre metamorphen Fazien: Serizit-Albit-Gneise, Phengit-Alkali-Feldspat-Gneise (Arollagneise). – Hauptminerale: Albit, saurer Plagioklas (zum Teil gefüllt), Quarz, Mikroklin, Serizit, Phengit, Biotit, Hornblende, Chlorit.
- 2 Gabbros (mit Übergängen zu Dioriten), Olivinggabbros, Peridotite, oft durchsetzt von Aplitgängen, übergehend in die metamorphen Ausbildungen: Epidot-Chlorit-Albit-Schiefer, Strahlsteinschiefer. Zwischenlagerungen verschiedenartiger Gneise. – Hauptminerale: Plagioklas (Labrador bis Albit), zum Teil saussuritisiert (zoisitreich), Diallag, Hornblende, Olivin, Strahlstein, Epidot, Chlorit, Serpentin, Quarz, Serizit, Alkalifeldspat.
- 3 Gneise der Valpellineserie, vorwiegend Biotitgneise mit basischen Einlagerungen. – Hauptminerale: Saurer Plagioklas, Quarz, Biotit.
- 4 Marmore mit Silikaten, zwischengelagert Gneise wie unter 3. – Hauptminerale: Kalkspat, vorwiegend Kalksilikate, dazu Mineralien wie unter 3.
- 5 Kalkglimmerschiefer mit Einschaltungen von Grünschiefern. – Hauptminerale: Kalkspat, Quarz, Serizit, Epidot, Chlorit, Albit.



Fig. 18 Arollagletscher (Nr. 30)

- 1 Granite und Granodiorite mit aplitischen Einlagerungen, übergehend in ihre metamorphen Fazien: Serizit-Albit-Gneise, Phengit-Alkali-Feldspat-Gneise (Arollagneise). – Hauptminerale: Albit, saure Plagioklase (zum Teil gefüllt), Quarz, Mikroklin, Serizit, Phengit, Biotit, Hornblende, Chlorit.
- 2 Gabbros (mit Übergängen zu Dioriten), Olivinggabbros, Peridotite, oft durchsetzt von Aplitgängen, übergehend in die metamorphen Ausbildungen: Epidot-Chlorit-Albit-Schiefer, Strahlsteinschiefer. Zwischenlagerungen verschiedener Gneise. – Hauptminerale: Plagioklas (Labrador bis Albit), zum Teil saussuritisiert (zoisitreich), Diallag, Hornblende, Strahlstein, Epidot, Chlorit, Serpentin, Olivin, Quarz, Serizit, Alkalifeldspat.
- 3 Gneise der Valpellineserie (genauerer Charakter nicht bekannt).

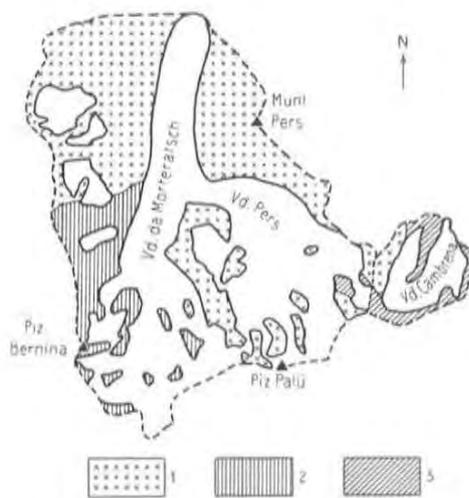


Fig. 19

Morteratschgletscher – Cambrenagletscher  
(Nrn. 36–38)

- 1 Saure Eruptivgesteine (Granite, Granodiorite, Alkaligranite, Alkalisyenite, Quarzporphyre) mit aplitischen und lamprophyrischen Gängen und mit Einschaltungen von Gneisen. – Hauptminerale: Alkalifeldspäte (Mikroklin, Perthit), saure Plagioklase, Quarz, Biotit, Hornblenden.
- 2 Intermediäre bis basische Eruptivgesteine (Diorite, Monzonite, Gabbros) mit aplitischen und lamprophyrischen Gängen. – Hauptminerale: Hornblende, mittelbasische Plagioklase (zum Teil in zoisitreichen Saussurit umgewandelt), Alkalifeldspäte, Pyroxen.
- 3 Serizitreiche Gneise und Schiefer, Paragesteine. – Hauptminerale: Serizit, Quarz, saure Plagioklase.

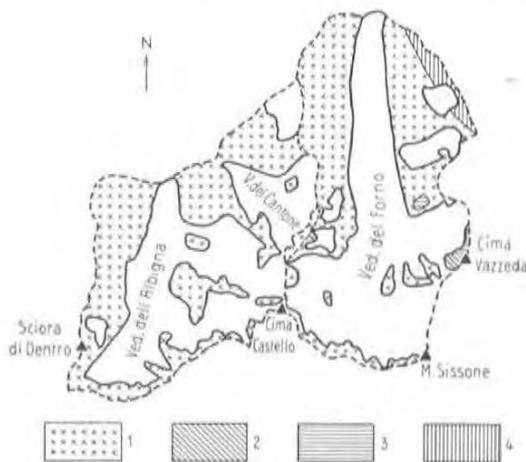
### 5. Die Gletscher in den jungen Graniten des Bergeller Massivs.

Stromgebiet des Po:	Tab.-Nr.	Fig.-Nr.
Fornogletscher	33	} 20
Albignagletscher	34	

**Geologische Kennzeichen:** Der junge Bergeller Granit, der diese Gletscher umrahmt und unterlagert, zeigt starke Variabilität in der Zusammensetzung. Im Bergell ist er eher sauer und oft kalifeldspatreich, besonders in seiner porphyrischen Fazies. Dann ist zu berücksichtigen, daß beim Fornogletscher die metamorphe Kontakthülle mit alten Gneisen, metamorphen Bündnerschiefern und Kontaktmarmoren triasischen Alters wesentlich andere Löslichkeitsverhältnisse zeigt. Da diese Gesteine aber arealmäßig sehr stark in den Hintergrund treten, können sie die Wasserzusammensetzung nicht stark beeinflussen.

Die große Frische des Granites bedingt, daß der Plagioklas nicht, wie bei den andern ältern kristallinen Gesteinen, als Ca-Lieferant in Frage kommt. Andererseits kann der reichliche Kalifeldspat sich bei der Verwitterung weitgehend zersetzen und beträchtliche Mengen K in das Gletscherwasser liefern. Dies ist besonders beim Albignawasser in extrem starkem Maße der Fall, während die Alkaligehalte des Fornogletscherwassers das normale Maß nicht übersteigen und auch das Alk/Ca-Verhältnis etwa dem Mittel der Gletscherwässer aus andern Kristallin-gebieten entspricht.

Ob in der Albigna die Anwesenheit radioaktiver Mineralien, wie Uranocker, Pechblende, die Zersetzung des Kalifeldspates beschleunigt, ist eine Frage, die hier nur angedeutet werden soll.



- 1 Granit bis Granosyenit, großenteils grobkörnig, porphyrtartig, mit spärlichen basischeren Einlagerungen. – Hauptminerale: Orthoklas, saure Plagioklase, Quarz, Biotit.
- 2 Paragneise, durchsetzt von Dolomitlagen, Kalkschiefern und Granitgängen.
- 3 Dolomitmarmore, Kalkschiefer, durchsetzt von Granit- und Aplitgängen.
- 4 Grünschiefer und Amphibolite, Zwischenlagen von Kalkschiefern, durchsetzt von Granitgängen.

Fig. 20 Fornogletscher – Albignagletscher  
(Nrn. 33, 34)

### F. Die Zusammenhänge zwischen der Gesteinszusammensetzung und dem Mineralgehalt der Gletscherwässer.

#### Zusammenfassung.

Auf Grund der geologischen Struktur, der Mineralbestände und der chemischen Zusammensetzung der Gesteinstypen und -zonen im Einzugsgebiet der Gletscher können wir uns ein Bild über die mittlere chemische Zusammensetzung der Gesteine des Gletschergebietes machen.

Über den Verlauf der Gesteinszonen unter dem Eis des Gletschers können nur dann mit einiger Sicherheit Aussagen gemacht werden, wenn diese Zonen steil stehen und zu

beiden Seiten der Eismassen in ähnlicher Mächtigkeit sich vorfinden. Oft helfen Aufschlüsse innerhalb des Gletscherareals, die Gesteinsgrenzen mit genügender Genauigkeit zu konstruieren.

Handelte es sich bei den Gletscherwässern um oberflächliches Schmelzwasser, so wäre keine starke Stoffkonzentration zu erwarten, und die Gesteinsarten müßten nach Maßgabe ihrer Arealzusammensetzung und Ausdehnung und nach Maßgabe ihrer Löslichkeit ihren Einfluß auf den Mineralgehalt des Wassers geltend machen.

Bei großem Anteil von Quellwasser am Wintergletscherwasser beim Gletschertor ist dagegen das Lokalkolorit der starken und harten Quellen für die stofflichen Eigenschaften des Gletscherwassers von Bedeutung, und wir können nicht mehr eine strenge

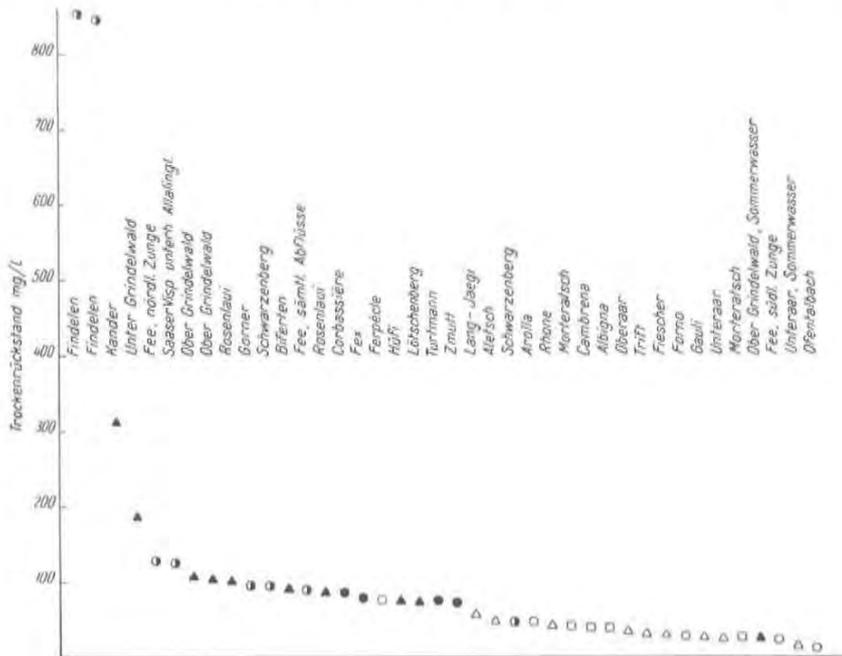


Fig. 21

Trockenrückstand der einzelnen Gletscherwässer.  
Signaturen siehe Fig. 22.

Abhängigkeit vom Arealchemismus der Gesteine erwarten. Die Gesteinszusammensetzung der Quellhorizonte wird dominieren und die Stoffkonzentration im allgemeinen größer sein als bei Vorwiegen von Oberflächenschmelzwasser. Diese Annahmen werden bestätigt, wenn wir die Sommer- und Winterwässer derselben Gletscher miteinander vergleichen. Trotz stärkerer Trübung enthalten die Sommerschmelzwässer durchweg bedeutend weniger gelöste Stoffe.

In großen Zügen wird aber doch eine Abhängigkeit von der Hauptgesteinszusammensetzung bestehen bleiben, und insbesondere werden größere Unterschiede im Stoffbestand der Gletscherwässer in Kristallin- und Kalkgebieten zu erwarten sein. Aus den Figuren 21 und 22 ist diese Abhängigkeit deutlich ersichtlich: Die Gletscherwässer aus Gebieten mit Kalkgesteinen weisen durchweg höhere Trockenrückstände auf. Die Werte sind im Mittel mehr als doppelt so hoch als bei den Gletscherwässern auf reiner Kristallingrundlage. Die Zunahme ist ausschließlich auf Vermehrung des  $\text{CaCO}_3$ - und Ca-Sulfat-Gehaltes

zurückzuführen. In Fig. 22 verschieben sich demgemäß die Projektionspunkte der Wässer aus Kalkgebieten stark gegen die Ca-Ecke hin.

Es gibt dann allerdings Wässer von Gletschern aus reiner Kristallinunterlage, welche etwas aus dem Rahmen fallen und verhältnismäßig hohe Gehalte an Trockenrückstand aufweisen. Das besondere Verhalten des Ferpèlegletschers wurde bereits erwähnt. Bei

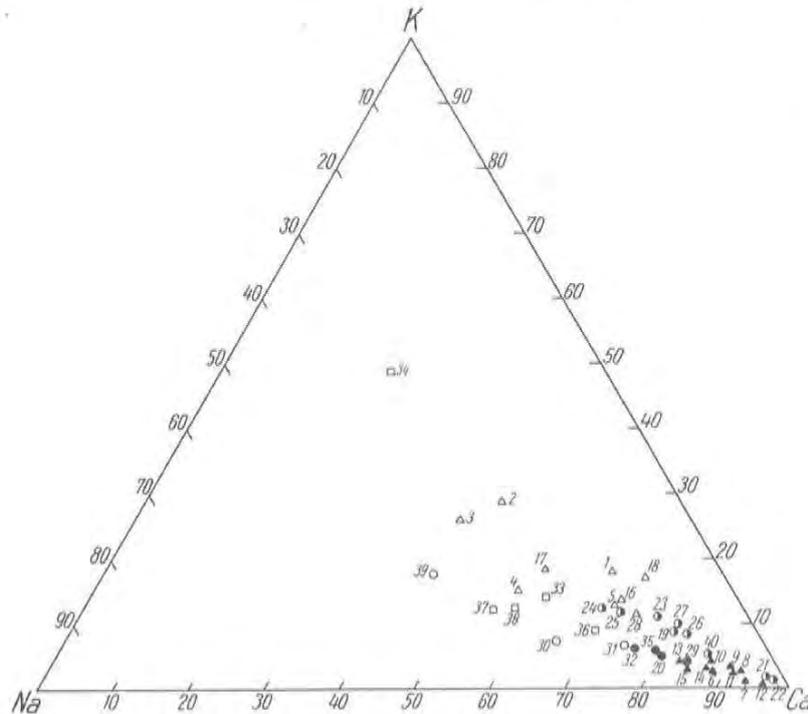


Fig. 22

Beziehungen zwischen  $K^+$ -,  $Na^+$ - und  $Ca^{++}$ -Gehalt bei den Gletscherwässern.

#### Untergrund

- △ Kristalline Gesteine des Aarmassivs ohne nennenswerten sedimentären Anteil.
- ▲ Kristalline Gesteine des Aarmassivs und kalkige Sedimente.
- Kristalline Gesteine der penninischen Region ohne nennenswerten Anteil an Trias und Bündnerschiefern.
- Kristalline Gesteine der penninischen Region und Gesteine der Trias und Bündnerschieferserie.
- ⊙ Kristalline Gesteine der penninischen Region mit viel basischen Eruptiva und mit Trias und Bündnerschiefern.
- Granite und Diorite der Berninagruppe und des Bergells.

allen abnormalen Gletscherwässern aus Kristallingebieten sind die  $SO_3$ -Werte verhältnismäßig hoch (siehe Fig. 23 und 24), was darauf schließen läßt, daß Gipswasser entweder aus Nachbargebieten mit Triasgesteinen oder erzeugt durch Zersetzung und Oxydation von sulfidischen Erzen dem Gletscherwasser beigemischt wurde.

Für die Gletschergebiete mit genauer bekannter Geologie der Umgebung wurden die Areale der verschiedenen Gesteinszonen abgegrenzt und mit dem Planimeter ausgemessen. Durch Multiplikation mit der mittleren chemischen Zusammensetzung der wichtigsten

Gesteinsarten der betreffenden Zone konnte eine mittlere chemische Zusammensetzung der Gesteinsoberfläche (Arealzusammensetzung) bestimmt und mit der Wasserzusammensetzung verglichen werden.

Da ein Vergleich der Oberflächenprozent der Karbonatgesteinsarten mit der Wasserzusammensetzung die Unterschiede bei den Kristallingebieten zuwenig deutlich hervortreten ließ, wurden aus den mittleren Molekularwerten der Arealzusammensetzungen die Quotienten  $si/c$ , die ebenfalls ein Maß für den Gehalt an Karbonatgesteinen geben, ermittelt und mit den Stoffkonzentrationen der Wintergletscherwässer verglichen.

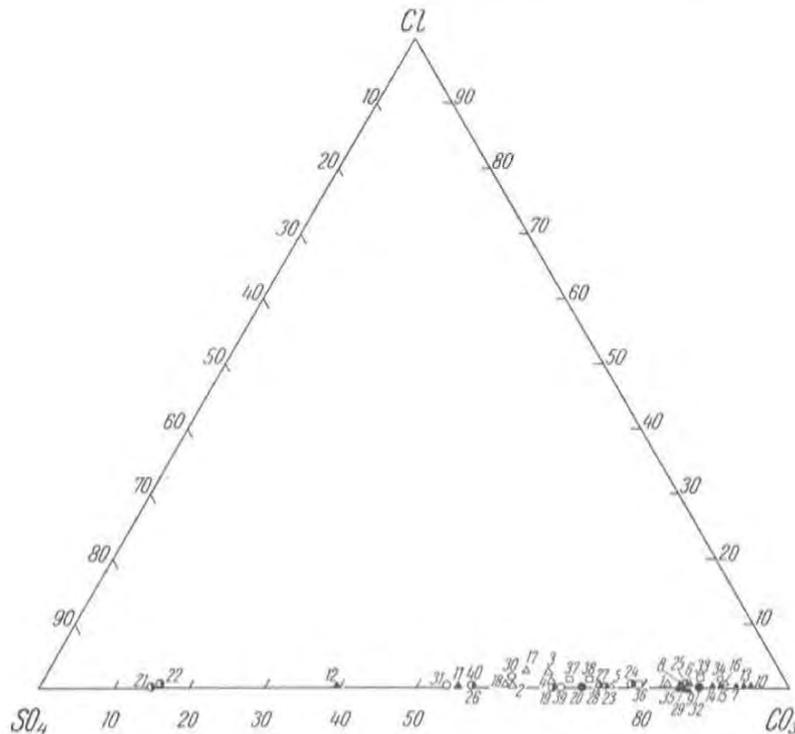


Fig. 23

Beziehungen zwischen  $Cl'$ - $SO_4''$  und  $HCO_3'$ -Gehalt in Gletscherwässern.  
Signaturen siehe Fig. 22.

Man erkennt dabei, daß bei gleichen  $si/c$ -Werten, also gleichartiger Arealzusammensetzung, die Streuung der Gehalte an Ca, Alk, Trockenrückstand,  $SO_4''$ -Ionen im Gletscherwasser recht groß ist. Das generelle Verhalten ist aber recht deutlich ersichtlich (siehe Fig. 24).

Mit Zunahme der *Karbonatgesteine* (kleine  $si/c$ -Werte) *Ansteigen* des Trockenrückstandes, des  $Ca''$  und  $SO_4''$ -Gehaltes und Zunahme der Streuung, —

dagegen umgekehrt: kleine Werte und geringe Streuung für die Alkali-Ionen bei niedrigem  $si/c$ , schwaches Ansteigen des Alkaligehaltes und größere Streuung bei Gletscherwässern in Kristallingebieten mit hohem  $si/c$ .

Die Gletscherwässer aus Gebieten mit nur geringem Karbonatgesteinsanteil nehmen eine Mittelstellung ein, jedoch kann dort der Betrag der vorhandenen Streuung nicht beurteilt werden, da diese Fälle nicht sehr zahlreich sind.

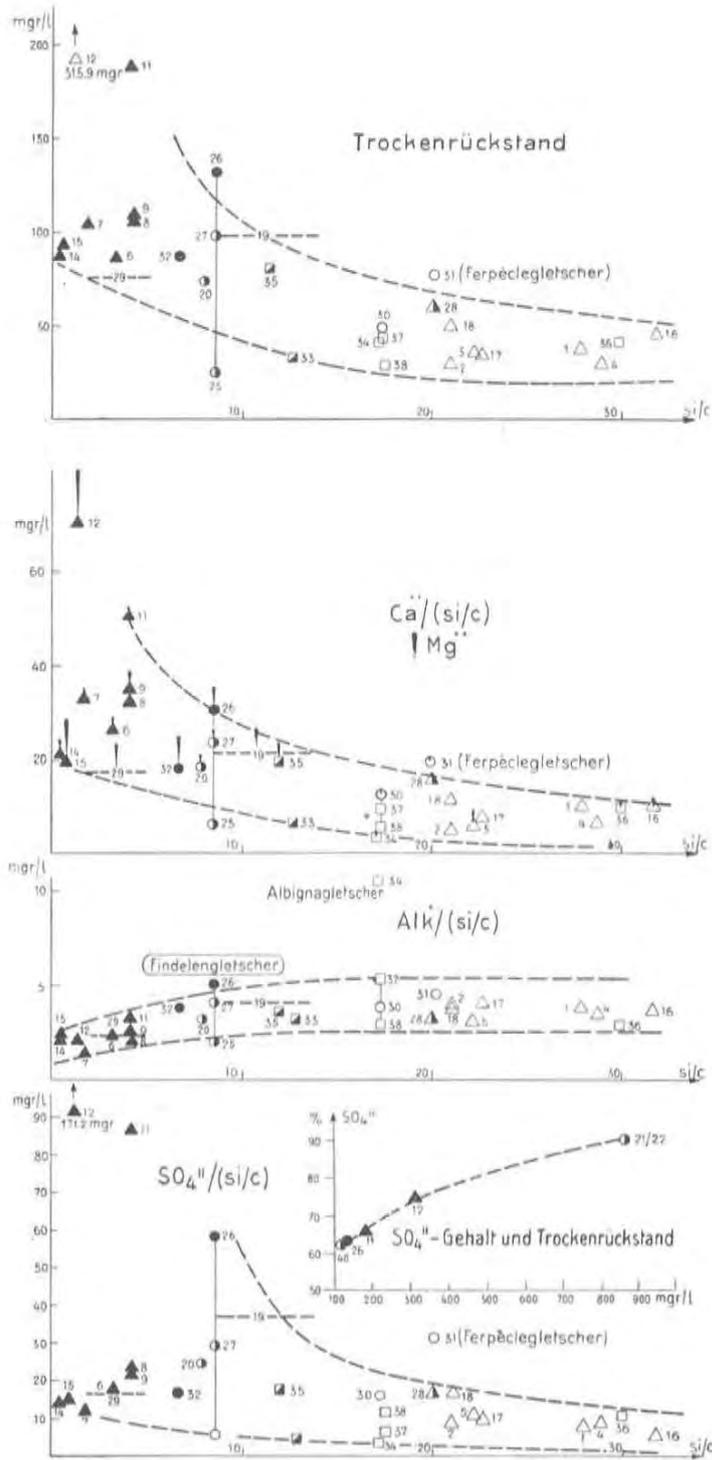


Fig. 24 Beziehungen zwischen der Gesteinszusammensetzung (si/c-Werte) und dem Mineralgehalt der Gletscherwässer (in mg/l). – Signaturen siehe Fig. 22.

Unten rechts: Vergleich von Trockenrückstand (mg/l, Abszisse) und SO<sub>4</sub><sup>-</sup>-Gehalt bei Werten > 100 mg/l. Ordinate = % SO<sub>4</sub><sup>-</sup> der Anionen.

Zeichenerklärung siehe Fig. 21 bis 23, dazu:

- ▲ Untergrund vorwiegend kristalline Gesteine des Aarmassivs und wenig Karbonatgesteinsanteil.
- Untergrund vorwiegend kristalline Gesteine der Bernina und des Bergells mit Trias, Bündnerschiefern und basischen Eruptivgesteinen.

Die den Signaturen beige-schriebenen Nummern entsprechen der Numerierung in den Tabellen 27 und 28.

Das besondere Verhalten des Ferpèclegletschers wurde bereits erwähnt. Die durch besonders hohen Gipsgehalt ausgezeichneten Wässer der Findelen-, Kander- und Unteren Grindelwaldgletscher sind aus den besonderen geologischen Verhältnissen in den Zungengebieten dieser Gletscher zu erklären. An allen Orten treten in der Nähe des Gletschertores rauhwacke- und gipsführende Triasgesteine zutage.

Am Unteren Grindelwaldgletscher ist Rauhwacke am Kalliband und am Mettenberg-W-Hang aufgeschlossen. Die Absenkung zur Rottaldepression liefert am Brunnhorn aus diesem Horizont Quellwasser. Am Kanderfirn tritt der Gletscherbach in einer rauhwackehaltigen Triassynklinale zutage. Vom Findelengletscher werden nordweststreichende Triasdolomitlamellen im Zungengebiet durch den Gletscher angeschnitten.

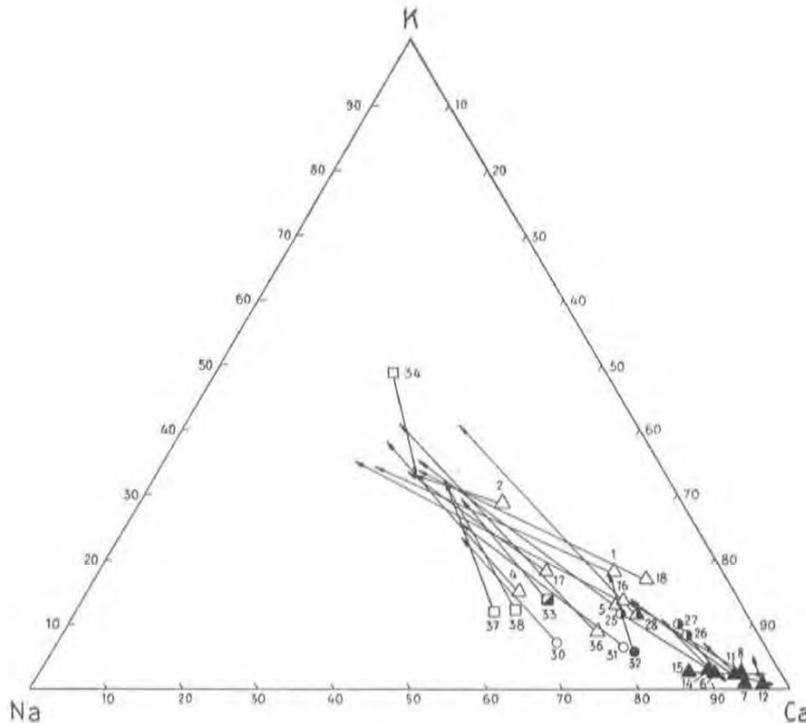


Fig. 25

Das Verhältnis der Alkalien zum Calcium bei den Gesteinen des Untergrundes und im Trockenrückstand der Gletscherwässer. Pfeilspitzen = Gesteinszusammensetzungen.

Zeichenerklärung siehe Fig. 22.

Die Nummern entsprechen der Numerierung in den Tabellen 27 und 28.

Mit Ausnahme des Albignagletscherwassers, dessen Besonderheit bereits diskutiert wurde, streuen die Alkaligehalte wenig und sind bei hohen  $si/c$ -Werten nur unbedeutend größer.

Der dominierende Einfluß der Ca-Mineralien und unter ihnen besonders der leicht löslichen Karbonate kommt auch bei einem Vergleich des  $alk/c$ -Verhältnisses der Gletscherwässer mit den Arealzusammensetzungen der Gesteine zur Geltung.

In Fig. 25 bemerkt man, daß die meisten Verbindungslinien Wasserzusammensetzung-Gesteinschemismus von der Ca-Ecke weg gerichtet sind. Bei Gletschern mit überwiegender

Kalkgrundlage sind ähnliche Werte für Gestein und Wasser zu beobachten. Gesetzwidrig verhält sich nur der Albignagletscher (34), wo der Alkaligehalt des Wassers extrem hoch ist.

Die Unterschiede im Alk/Ca-Verhältnis zwischen Gesteinsareal und Wasserzusammensetzung sind bei den Gletschern mit Kristallingesteinsunterlage im allgemeinen größer als bei Anwesenheit von Karbonatgesteinen.

*Zusammenfassend kann man feststellen, daß nur in großen Zügen eine Abhängigkeit der Mineralzusammensetzung des Wassers vom Gesteinschemismus besteht. Mit Ausnahme des Albignagletschers und des Ferpèclegletschers können Abweichungen vom generellen Verlauf aus den lokalgeologischen Verhältnissen, vor allem in den Zungengebieten, erklärt werden.*

*Diese Beziehungen und die hohen Stoffkonzentrationen machen wahrscheinlich, daß im Winter bedeutende Mengen Quellwasser den Gletscherbächen beigemischt sind.*

### G. Arealchemismus und Fördermenge gelöster Stoffe pro Zeit- und Flächeneinheit.

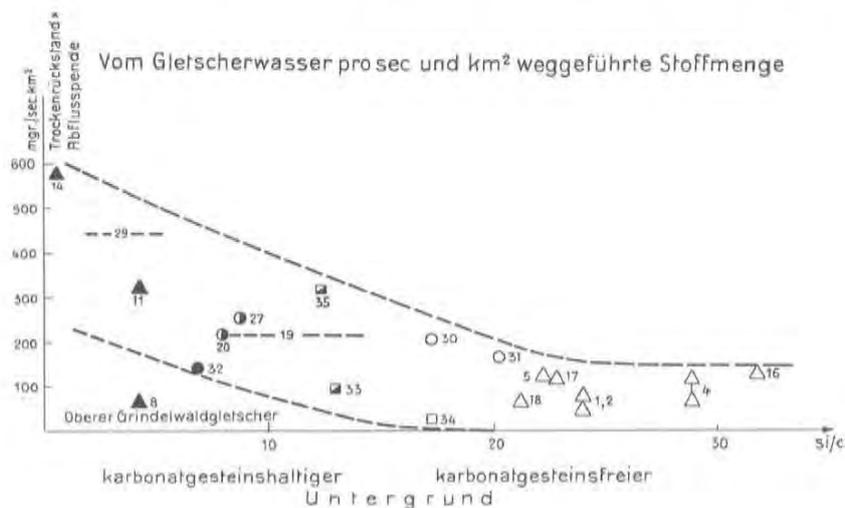


Fig. 26

Beziehungen zwischen weggeführter Stoffmenge und Zusammensetzung des Untergrundes (si/c-Werte).

Zeichenerklärung siehe Fig. 22.

Die Nummern entsprechen der Numerierung in den Tabellen 27 und 28.

Von einigen Gletscherbächen sind uns die im Winter geförderten Wassermengen bekannt. Bezogen auf das Gletscherareal und mit den Mineralgehalten multipliziert, geben sie uns ein Maß für die pro Flächen- und Zeiteinheit in Lösung weggeführten Stoffe.





J. Tabelle der Projektionswerte für die Figuren 24 bis 26.

Tabelle 27

Nr.	Gletscher	Gesteinsarten des Gletscherareals (Arealchemismus) Mol. %				Wasser- zusammensetzung mg/l				Menge gelöster Stoffe (Tr. rst. x Abfl. sp.)
		si/c	Na	K	Ca	Tr.- rst.	Ca <sup>++</sup>	Alk <sup>'</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>''</sup>	
1	Oberaar . . . . .	28	38,0	34,4	27,6	38,0	9,5	3,7	7,6	76,5
2	Unteraar . . . . .	21,1	33,3	33,2	33,5	29,0	4,5	4,0	8,7	58,3
4	Gauli . . . . .	28,9	34,3	38,5	27,2	29,2	6,1	3,35	8,5	124,73
5	Trift . . . . .	22,2	31,6	35,5	32,9	35,4	9,4	3,0	10,3	127,5
6	Rosenlauri, rechts . . . . .	3,27	11,9	10,8	77,3	86,1	26,1	2,3	16,1	—
7	Rosenlauri, links . . . . .	1,89	7,9	7,2	84,9	103,4	33,3	1,5	11,8	—
8	Oberer Grindelwald } . . . . .	4,28	14,5	13,9	71,6	105,6	32,3	2,0	22,8	69,7
9	Oberer Grindelwald } . . . . .					109,0	33,7	2,55	21,5	72,0
11	Unterer Grindelwald . . . . .	4,27	14,1	13,9	72,0	189,5	50,2	3,2	86,1	318
12	Kanderfirn . . . . .	1,47	3,3	4,4	92,4	315,9	70,3	2,0	170,7	—
14	Hüfi . . . . .	0,36	1,8	0,6	97,6	77,5	20,5	2,0	12,9	577,7
15	Biferten . . . . .	0,43	2,2	2,4	95,4	92,3	19,8	2,3	14,0	—
16	Rhone . . . . .	31,9	40,2	35,4	24,4	42,5	11,0	3,5	5,2	138
17	Fiescher . . . . .	22,7	33,9	33,9	32,2	34,7	7,4	4,0	9,9	118
18	Aletsch . . . . .	21,1	32,6	34,0	33,4	49,9	11,65	3,7	16,95	69,8
19	Gorner . . . . .	um 12	—	?	—	98,7	21,5	4,0	36,5	217
20	Z'Mutt . . . . .	8,0	19,6	16,3	64,1	74,5	18,8	3,2	24,2	216
21	Findelen . . . . .	um 8	—	?	—	858,0	201,0	5,65	543,4	3226
22	Findelen . . . . .					846,8	197,6	2,2	538,1	3218
25	Fee S. . . . .	8,6	8,0	1,4	90,6	24,6	6,7	2,0	5,2	—
26	Fee NE. . . . .	—	—	—	—	130,7	30,7	5,1	57,9	—
27	Fee total . . . . .	—	—	—	—	90,8	21,9	4,1	29,5	254
28	Lang . . . . .	20,1	23,4	41,1	35,4	58,9	15,6	4,2	17,0	—
29	Turtmann . . . . .	um 3 bis 4	?	—	—	76,0	18,8	2,4	15,9	441
30	Arolla . . . . .	17,4	31,7	23,3	45,0	49,2	11,3	3,9	15,8	202
81	Ferpècle . . . . .	20,1	30,8	25,9	43,3	77,9	19,5	4,5	30,7	171,5
32	Corbassière . . . . .	6,8	14,5	18,0	67,4	86,0	17,9	3,8	16,4	147
33	Forno . . . . .	12,9	29,0	29,7	41,3	30,3	6,7	3,1	4,8	95
34	Albigna . . . . .	17,2	33,2	33,1	33,7	40,1	3,75	10,5	3,5	29,7
35	Fex . . . . .	12,0	24,8	24,5	50,7	79,2	19,4	3,5	17,4	323
36	Cambrena . . . . .	30,0	31,4	41,1	27,5	41,3	9,1	2,75	10,7	—
37	Morteratsch . . . . .	17,5	29,8	32,4	37,8	41,8	9,1	5,2	11,7	—
38	Morteratsch . . . . .					29,0	5,6	2,9	7,0	—

Die Erwartung, daß auch hier die Gebiete mit kleinen si/c-Werten der Gesteine höhere Fördermengen zeigen werden, da die leichter löslichen Karbonatgesteine mehr Material liefern, wird nur zum Teil bestätigt. Die Streuung ist besonders bei den Gletschern in Kalkgebieten sehr groß. Der Hüfigletscher vermag durch hohe Abflußspende trotz mittlerem Mineralgehalt des Wassers die Fördermenge zu erhöhen. Der Obere Grindelwaldgletscher fällt aus dem Rahmen, indem bei mittlerem Mineralgehalt die Abflußspende klein ist. Diese Verhältnisse sind eher eine Stütze für die Annahme, daß im wesentlichen Quellwasser den Gletscherbach beliefert. Größere Schmelzwassermengen müßten die Abflußspendenwerte ausgleichen.

### K. Wintergletscherwasser und Quellwasser.

Der Vergleich der Gletscherwässer mit Quellwasseranalysen aus der Umgebung ist nur in wenigen Fällen möglich, da sehr wenig genaue Quellwasseranalysen aus dem Hochgebirge bekannt sind.

Für die Umgebung von Zermatt zeigen die Quellen unter der Riffelalp («Trinkbrunnen») und im Findental («Findelen») kleinere Mineralgehalte als die Gletscherwässer des Findelen-, Gorner- und Z'Muttgletscherbaches.

Vergleich von Zermatter Quell- und Gletscherwasser

Tabelle 28

Quellwasser		Gletscherwasser				Komponenten
«Findelen»	«Trinkbrunnen»	Z'Muttgletscher	Gornergletscher	Findelengletscher		
58	72	74,5	98,7	858	846,8	Trockenrückstand franz. Härtegrad Alkalität
5,8	7,75	5,7	8,2	64,8	62,2	
4,25	6,0	3,7	4,5	6,0	5,8	
0,08	0,05	1,2	2,3	3,15	2,8	K
0,7	1,15	2,0	1,7	2,7	2,4	Na
11,65	17,6	18,8	21,5	201,0	197,6	Ca
4,7	5,3	1,9	5,3	31,6	31,0	Mg
0,025	0,045	0,2	0,05	0,1	0,05	Al
0,014	0,024	0,01	0,01	0,01	0,01	Fe
10,5	6,5	24,2	36,5	543,4	538,1	SO <sub>4</sub> ''
3,6 °C	4,2	0,07	0,66	6,07		Temp.

Wenn wir von den abnormalen Verhältnissen des Findelengletscherwassers absehen, ist der Unterschied allerdings nicht groß. Die Quellwässer sind durch einen wesentlich kleineren Na- und SO<sub>4</sub>''-Gehalt ausgezeichnet. Dabei ist allerdings zu bemerken, daß es sich beim Zermatter Quellwasser um außergewöhnlich weiches, hypomineralisiertes Wasser handelt. Die Herkunft aus ultrabasischen Eruptivgesteinen (Serpentin) ist aus dem hohen Mg-Gehalt, dem Mg/Ca-Verhältnis und dem niedrigen Alk-Gehalt ersichtlich.

Die vergleichbaren Zusammensetzungen der Zermatter Quell- und Wintergletscherwässer sind eine weitere Stütze für die Annahme, daß den Gletscherwässern im Winter wesentliche Mengen Quellwasser beigemischt sind.

Die Quellwassertemperaturen liegen trotz größerer Höhenlage wesentlich über den Temperaturen der normalen Gletscherwässer (Ausnahme Findelenwasser).

### L. Literaturangaben.

1. Collet L. W.: Beitrag zur Geologischen Karte der Schweiz, N. F. 63. Lief.
2. Hügi T.: Schweiz. Min. Petr. Mitt. Bd. XXI, 1941, S. 1
3. Jäckli H. und Kleiber K.: Eclogae geol. Helv. Bd. 36, 1943, S. 7
4. Krebs J.: Beitrag zur Geologischen Karte der Schweiz, N. F. 54. Lief.
5. Lütchg O., Eichenberger R. u. a.: Über Niederschlag und Abfluß im Hochgebirge, Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes, Zürich 1926
6. Lütchg O.: C. R. du Congrès international de Géographie, Tome II, Section II, Paris 1931
7. Müller F.: Beitrag zur Geologischen Karte der Schweiz, N. F. 74. Lief.
8. Rohr K.: Beitrag zur Geologischen Karte der Schweiz, N. F. 57. Lief.

### Karten:

- I. Argand E.: Carte géologique du Massiv de la Dent Blanche
- II. Argand E.: Carte géologique de la région du Grand Combin
- III. Günzler-Seiffert H.: Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 396, Grindelwald, 1938
- IV. Krebs J.: Geologische Karte der Blümlisalppgruppe
- V. Staub R.: Geologische Karte des Berninagebietes
- VI. Winterhalter R. U., de Quervain F., Niggli P.: Geotechnische Karte der Schweiz, Blatt III

