

Gletscherschwankung und Gletscherbewegung

Autor(en): **Haefeli, Robert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73 (1955)**

Heft 42: **100 Jahre Eidg. Technische Hochschule**

PDF erstellt am: **26.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-62001>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

zeigt wurde, hat man eine Spannweite von 114,25 m mit einer Pfeilhöhe von 30 m erreicht (Entwurf *Ammann & Withney*, beratende Ingenieure, New-York). Eine sehr kühne Konstruktion ist die Ausstellungshalle 5 in München (Bild 14), wo, bei einem Abstand der Binder von 10 m, ein Krümmungsradius von 75 m ausgeführt wurde; Binder und Ecken der Schale sind dabei vorgespannt. Eine hübsche und phantasievolle Fabrikationshalle wurde als Shedkonstruktion mit schräggestellten zylindrischen kurzen Schalen ausgeführt, wobei die Binder als Fachwerkbogen in Verbundkonstruktion entworfen sind (Halle der Gummibandweberei in Gossau, SBZ 1954, S. 614 und 751).

Bei den zylindrischen Schalen der langen Typen wurden am meisten die symmetrischen Schalen mit oder ohne Rand-

glieder und die asymmetrischen in Form von Shedschalen verwendet. Bild 15 zeigt eine Omnibusgarage, die mit Schalen von 45,35 m mit vorgespannten Randgliedern abgedeckt ist. Die erste, mit Freyssinet-Kabeln vorgespannte zylindrische Schale mit Randgliedern wurde im Jahre 1943 bei den Flugzeughallen in Karachi mit einer Spannweite von 39 m ausgeführt. Vorgespannte Schalen mit gekrümmten Kabeln ohne Randträger wurden in England bei der Papierfabrik von Mersey mit einer Spannweite von 25,30 m, einer Breite von 7,62 m, einer Stichtiefe von 1,33 m und einer Dicke von 6,5 cm und Oberlichtern ausgeführt (Entwurf *C. V. Blumfield*). In der Schweiz hat das Bureau *E. Schmid* in Basel solche mit 20 m Spannweite und geraden Vorspannkabeln für eine Garage entworfen und ausgeführt.

Schluss folgt

Gletscherschwankung und Gletscherbewegung

Von Dr. Robert Haefeli, a. Prof. ETH, Zürich

I. Einleitung

Zwischen Schwankung und Bewegung eines Gletschers bestehen mannigfaltige Wechselwirkungen, denen nachzuspüren zu den interessantesten Aufgaben der Gletscherforschung gehört. Sind es doch gerade diese beiden polaren Begriffe, die uns die wahre Natur des Gletschers besonders deutlich zum Bewusstsein bringen. Sie wird dadurch offenbar, dass einerseits die Gestalt des Gletschers einer fortschreitenden Veränderung — *Schwankung* genannt — unterworfen ist, während andererseits die gestaltbildende Substanz selbst wieder einen ständigen Wandel (Metamorphose) und Austausch erleidet. Der Austausch erfolgt durch die *Gletscherbewegung*, die den Stoff vom Nährgebiet zum Zehrgebiet befördert, wobei sich die Umwandlung vom Firn- zum Gletscherkorn vollzieht. Die Schwankung bildet dabei die Regel, während der *stationäre Zustand* des Gletschers als Wende zwischen Wachstum und Schwund die seltene Ausnahme darstellt. In diesem speziellen Zustand hört die Schwankung praktisch auf, d. h. sie ist auf den jährlichen, einem langsamen Atmen vergleichbaren Rhythmus zwischen Sommer und Winter reduziert und lässt die Gletscherbewegung gleichsam in «Reinkultur» erscheinen (Idealgletscher).

Der Altmeister der Geologie, Prof. Alb. Heim, der die Bedeutung glaziologischer Forschung frühzeitig erkannte, hat dem schweizerischen Standardwerk «Vermessungen am Rhonegletscher» [1] folgende Worte vorausgehen lassen: «Für die Menschheit, die darauf angewiesen ist, die Gaben der Natur verständlich zu benützen, gewinnt die Erforschung aller ihrer Erscheinungen und damit im besonderen auch der Erscheinungen im Lebenshaushalte des Gletschers immer mehr Bedeutung, denn auch hier ist die wissenschaftliche Erkenntnis die Grundlage unserer Zukunft.» Diese Worte gelten in unserem technischen Zeitalter mehr denn je.

Mit einem geradezu unheimlichen Tempo ist es der menschlichen Zivilisation in den letzten Dezennien gelungen, nicht nur die höchsten Höhen zu erklimmen, sondern auch immer weiter in die nördlichsten und südlichsten Breiten der Erde — die gewaltigen vergletscherten Gebiete der Arktis und Antarktis — vorzudringen. Kein Wunder, dass die von den grossen Naturforschern vergangener Jahrhunderte begründete Glaziologie, welche eine der wichtigsten Grundlagen für die genannte Entwicklung bildet, heute den Techniker ebenso interessiert wie den reinen Naturwissenschaftler und Geologen. Deshalb sei nachstehend versucht, ältere und neuere Ergebnisse glaziologischer Forschungen unter besonderer Berücksichtigung alpiner und arktischer Verhältnisse in das Blickfeld des Ingenieurs zu rücken. Im Zeichen der Zentennialfeier der ETH lässt uns dabei der nachfolgende Rückblick auf den seit hundert Jahren fortschreitenden Gletscherschwund jener Männer gedenken, welche den Ruf unseres Landes als Heimat der Gletscherkunde begründet haben.

II. Hundert Jahre Gletscherschwund

1. Rückblick

Die Erkenntnis, dass der Gletscher in integraler Weise auf alle Arten der Klimaschwankungen auf mehr oder weniger sensible Art reagiert, lässt ihn je länger je mehr zu einem der wichtigsten Indikatoren der Klimaforschung werden. Schon Albert Heim bezeichnete den Gletscher als ein «gewaltiges Klimatoskop, das die Summenwirkung vieler Faktoren im Laufe von Jahrzehnten anzeigt und das zugleich in seinem Haushalt von Ernährung und Abschmelzung Jahre und Jahrzehnte ausgleicht» [1, 2].



ca. 1640 1818 1818
1602 (heute überbaut)

Bild 1. Rhonegletscher im August 1848, nach einem Aquarell von H. Hogard [1], mit Endmoränen früherer Jahre

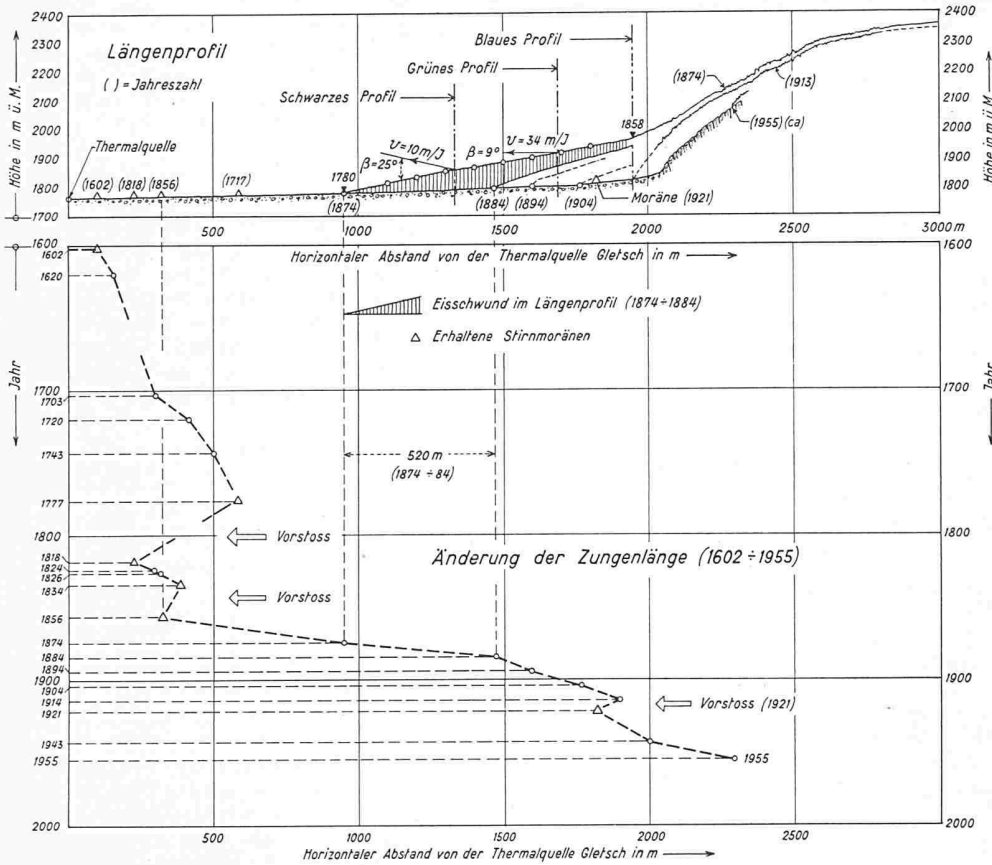


Bild 2. Rhonegletscher, Veränderungen der Gletscherzunge von 1602 bis 1955 im Längsschnitt. Nach Mercanton [1] mit Ergänzungen

Die Tatsache andererseits, dass zwischen den Gletscherschwankungen der verschiedenen Kontinente eine gewisse Parallelität besteht, veranschaulicht die erdweite Natur der in Frage stehenden Klimaänderungen. Dadurch gewinnen die Veränderungen der alpinen Gletscher, die — ganz abgesehen von den Grossschwankungen der Eiszeit — wenigstens bis ins frühe Mittelalter eingermassen bekannt sind, erhöhte Bedeutung.

Die durch Urkunden und Flurnamen belegte, von Legenden und Sagen umwobene Feststellung, dass die Vergletscherung der Alpen um die Jahrtausendwende weit hinter dem heutigen Stand zurückblieb, findet ihre Parallele in der Geschichte Grönlands, das im 10. Jahrhundert eine wesentlich grössere Bevölkerung (skandinavischer Herkunft) zu ernähren vermochte. Im 13. und 14. Jahrhundert schrumpfte diese Kolonie angeblich zusammen, weil die Vegetation verkümmerte und der Boden nicht mehr das zum Leben Notwendige hervorbrachte. Eine zunehmende Klimaverschlechterung machte sich auch in den Alpen bemerkbar, bis schliesslich im 16. Jahrhundert sämtliche Gletscher energisch vorstossen und jenen maximalen Stand erreichten, der seine Spuren in zahlreichen identifizierbaren Stirn- und Seitenmoränen zurückliess. Diese mittelalterlichen Moränen (1600 bis 1640) sind in der Regel gegenüber den bekannteren Stirn- und Seitenmoränen, die den auf vielen alten Stichen verherrlichten Gletscherstand der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts markieren, nur relativ wenig vorgeschoben (Bild 1).

Da es erst in neuerer Zeit möglich wurde, die Kontrolle der Gletscheränderungen über den ganzen Gletscher auszuweiten, müssen wir uns bei der Skizzierung der zwischen 1600 und 1900 erfolgten Schwankungen vorwiegend auf die Betrachtung der Gletscherzungen beschränken. Als besonders repräsentatives Beispiel sei der Rhonegletscher herausgegriffen, welcher dank der unter der Leitung der Schweiz. Gletscherkommission vom Eidg. Topographischen Bureau durchgeführten Vermessung (1874—1915) als der besterforschte Gletscher der Erde gelten darf [1] (Bild 1). Dabei lässt die Darstellung der horizontalen Längenänderungen der Gletscherzunge in Funktion der Zeit (Bild 2) [3] seit 1600 deutlich zwei Perioden unterscheiden: Eine erste Periode von

rund 250 Jahren (1602 bis 1856) mit relativ geringfügigen Schwankungen und eine zweite, um 1856 einsetzende Periode, welche den seit 100 Jahren nur durch einen kleinen Vorstoss der zwanziger Jahre unterbrochenen, allgemeinen Gletscherschwund umfasst. Die über das ganze Gebiet der Alpen ausgedehnten Beobachtungen ergaben, dass der Beginn dieses «Rückzuges» — je nach dem individuellen Charakter des betreffenden Gletschers — sich über eine Zeitspanne von 4 Jahrzehnten (1830—1870) erstreckte [4]. Während z. B. der temperamentvolle Limmerngletscher bereits um 1830 mit dem «Rückzug» einsetzte, war dies beim trägen Unteraargletscher, wo Agassiz und seine Mitarbeiter bereits um 1840—1843 das Gletscherphänomen in seiner ganzen Mannigfaltigkeit erfasst und studierten, erst 1871 der Fall [5]. Der Initiative von Prof. F. A. Forel ist es vor allem zu danken, dass die Veränderungen der Gletscherzungen unter der Leitung des 1868 von Prof. E. Rambert ins Leben gerufenen Gletscherkollegiums — ab 1893 Gletscherkommission genannt —

an einer grossen Zahl von Gletschern seit 1880 jährlich kontrolliert wurden, so dass vor kurzem der 75. Bericht über diese Gletscherkontrolle unter der tatkräftigen Mithilfe des Forstpersonals der Gebirgskantone und des Schweizerischen Alpen-Clubs (SAC) erscheinen konnte [6].

Das Verhalten des Rhonegletschers ist besonders repräsentativ für die Gletscherschwankung zwischen 1602 und 1914, d. h. solange, als die Gletscherzunge noch bis in den Talboden von Gletsch hinabreichte, was bis nach dem kleinen Vorstoss von 1921 der Fall war. Für die einzelnen Rückzugsperioden dieser Epoche ergeben sich auf Grund der Rhonegletschervermessung die in Tab. 1 enthaltenen Längenänderungen, deren zeitliche Entwicklung aus Bild 2 ersichtlich ist, während Bild 3 die raschen Querschnittsänderungen in zwei Profilen der Zunge für die Periode 1874—1910 veranschaulicht.

Die auffallenden, innerhalb relativ kleiner Zeitspanne eingetretenen Variationen der jährlichen Längenänderungen demonstrieren einerseits die hohe Empfindlichkeit der Gletscherzunge gegenüber kurzfristigen Klimaschwankungen,

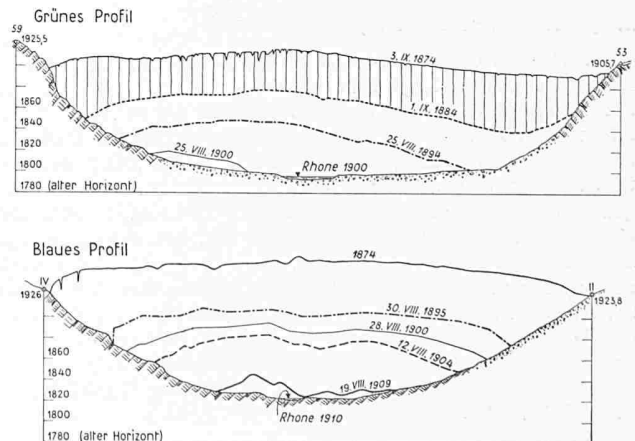


Bild 3. Rhonegletscher, Veränderungen von Querprofilen von 1874 bis 1910 (blaues und grünes Profil vgl. Bild 2). Nach Mercanton [1]

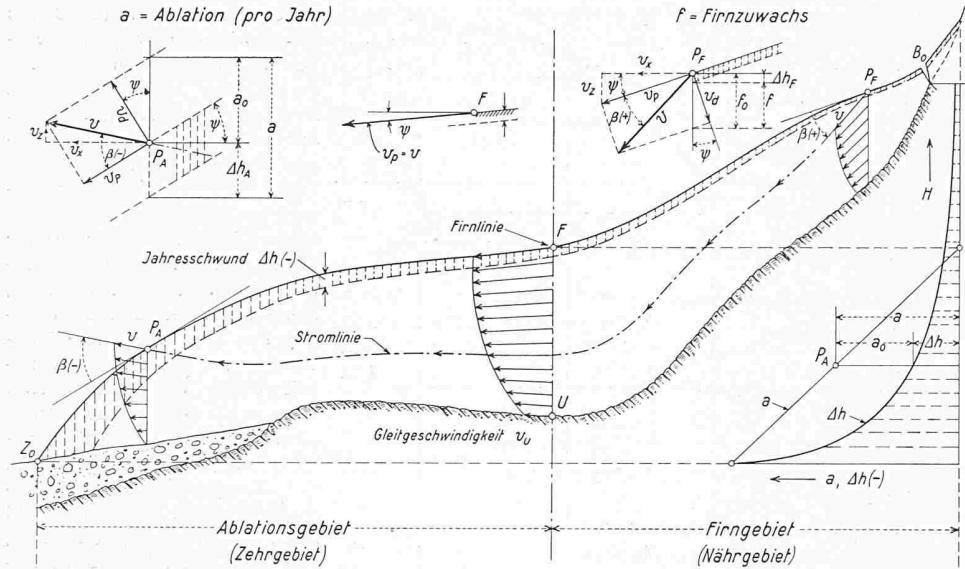


Bild 4. Beziehungen zwischen der jährlichen Höhenänderung der Gletscheroberfläche und der Fließgeschwindigkeit (Längsprofil, schematisch)

beleuchten aber andererseits die sehr komplexe Natur der Zungenschwankung als solche, die z. B. durch die um 1920 häufig beobachtete Tatsache bestätigt wird, dass sich ein speziell träger Gletscher — unbekümmert um eine momentane Klimaverschlechterung — weiterhin zurückzieht, während sein temperamentvollerer Nachbar prompt reagiert und vorübergehend vorstößt.

Tabelle 1

Längenänderungen des Rhonegletschers (1602—1914)

Rückzugsperiode	Anzahl Jahre	Abstand d. Zunge von d. Thermalquelle in m	«Zungenrückzug» total in m	Mittelw. in m pro Jahr
1602—1777	175	100—585	485	(2,8)
1818—1834	16	225—485	260	16,2
1856—1874	18	325—950	625	34,7
1874—1884	10	950—1470	520	52,0
1884—1894	10	1470—1595	125	12,5
1894—1904	10	1595—1765	170	17,0
1904—1914	10	1765—1965 ca.	200	20

In der langen Kette kausaler Zusammenhänge und Faktoren, die das Werden und Vergehen der Gletscher beeinflussen, nimmt zweifellos die Gletscherbewegung eine zentrale Stellung ein, was sich u. a. in der Tatsache spiegelt, dass jeder stationäre Zustand eines Gletschers das vollkommene Gleichgewicht zwischen Ernährung (Firnzuwachs), Bewegung und Abbau (Ablation) zur Voraussetzung hat. Deshalb werden nachstehend einige elementare Beziehungen zwischen der Schwankung und Bewegung eines Gletschers formuliert, die den heutigen Schwund im Gebiete der Gletscherzunge als einen Grenzfall erscheinen lassen.

2. Quantitative Beziehungen

Zwischen dem Firn- oder Nährgebiet einerseits und dem Ablations- oder Zehrgebiet andererseits besteht ein polares Entsprechen, das S. Finsterwalder klarlegte, als er seine für den stationären Idealgletscher gedachte Kinematik der Gletscherbewegung entwickelte, die auf der Voraussetzung der Kontinuität und der laminaren Strömung beruht. Ein im Firngebiet abgelagertes Eis- und Schutt-Teilchen taucht längs einer Stromlinie ins Gletscherinnere ein, um nach gegebener Zeit in einem bestimmten Punkt des Ablationsgebietes wieder aufzutauchen. Benachbarte Teilchen beschreiben benachbarte Stromlinien, die sich nie schneiden. Deshalb ist jeder Punkt des Nährgebietes mit einem Punkt des Zehrgebietes derart verbunden, dass die beiden durch die Firnlinie (F) voneinander getrennten Gebiete eindeutig auf einander abgebildet werden [7, 8].

Bezeichnen wir nach Bild 4 den Winkel zwischen der Gletscheroberfläche und dem Geschwindigkeitsvektor v eines Oberflächenpunktes P_F bzw. P_A als Kriechwinkel beta, so ist das

Eintauchen der Stromlinien im Firngebiet durch einen positiven, das Auftauchen derselben im Ablationsgebiet durch einen negativen Kriechwinkel gekennzeichnet (vgl. Bild 2, gemessene beta-Werte am Rhonegletscher [1]).

Für den stationären Gletscher ergeben sich gemäss Bild 4 zwischen der zur Gletscheroberfläche parallelen Geschwindigkeit v_p eines Punktes P einerseits und dem Firnzuwachs f₀ bzw. der Ablation a₀ andererseits folgende, auf die Jahresperiode bezogene Ausdrücke:

Firngebiet

$$(1) f_0 = v_p \frac{\text{tg } \beta}{\cos \psi}$$

Ablationsgebiet

$$(2) a_0 = v_p \frac{\text{tg } \beta}{\cos \psi}$$

An der Firnlinie, wo sich Firnzuwachs und Ablation die Waage halten, wird definitionsgemäss nicht nur f₀ = a₀ = 0, sondern auch beta = 0, d. h. die Bewegung erfolgt hier in Oberflächennähe parallel der Gletscheroberfläche.

Die Schwankungen des nichtstationären Gletschers als Ganzes, die sich äusserlich durch eine Gestaltänderung manifestieren, lassen sich am besten durch die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche erfassen. Bezeichnet man die Aenderung der Meereshöhe eines topographisch festgelegten Punktes pro Jahr mit Delta h, den jährlichen Firnzuwachs allgemein mit f und die Ablation mit a, so gelten nach Bild 4 die nachstehenden Relationen:

Firngebiet

$$(3) \Delta h_F = f - f_0 = f - v_p \frac{\text{tg } \beta}{\cos \psi}$$

Ablationsgebiet

$$(4) \Delta h_A = a_0 - a = v_p \frac{\text{tg } \beta}{\cos \psi} - a$$

worin bedeuten:

- f = Firnzuwachs in m Firn pro Jahr (allgemein).
- f₀ = Firnzuwachs im stationären Zustand (speziell).
- a = Ablation in m Eis (allgemein).
- a₀ = Ablation im stationären Zustand (speziell).
- v_p = Geschwindigkeitskomponente parallel zur Gletscheroberfläche (in m/Jahr).
- beta = Kriechwinkel = alpha zwischen Oberfläche und Geschwindigkeitsvektor v_p.
- psi = Neigungswinkel der Gletscheroberfläche.

Der stationäre Zustand erscheint hier als Spezialfall (Delta h = 0), für den die Gleichungen 3 und 4 in die Gleichungen 1 und 2 übergehen. Alle diese Formulierungen bilden ja nur einen adäquaten Ausdruck für die lapidare Tatsache, dass jede Höhenänderung der Gletscheroberfläche die Resultierende zweier entgegengesetzter Komponenten darstellt, nämlich von

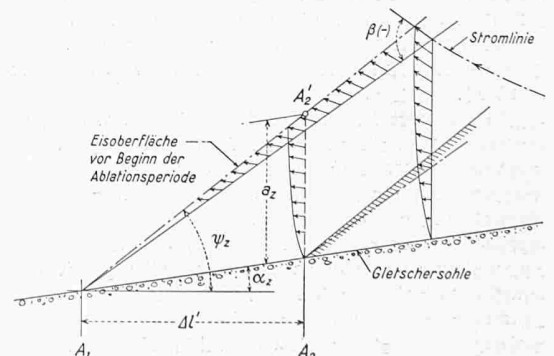


Bild 5. Jährliche Ablation und Längenänderung der Gletscherzunge bei fehlender Gleitbewegung (Längsprofil schematisch)

Firnzuwachs und Eisabfluss im Firngebiet bzw. von Ablation und Eisnachschub im Ablationsgebiet. Nur die Firnlinie macht eine Ausnahme, indem dort der Schwund unabhängig ist vom Eisnachschub ($\beta = 0$), im Gegensatz zum Zehrgebiet, wo der Schwund um so grösser wird, je kleiner der Eisnachschub ist.

An der Gletscherzunge, wo der Eisnachschub in besonders hohem Masse von der Intensität der Gleitvorgänge abhängt, erreicht somit der Schwund ein optimales Mass dann, wenn weder im Innern der Eismasse, noch auf der Gletschersohle Gleitprozesse stattfinden ($v_u = 0$), so dass die ganze Bewegung bzw. der Nachschub allein auf der plastischen Verformung des Eises beruht (Kriechvorgang)*. Für das Gletscherende gilt in diesem speziellen Fall, der heute im Gebiet flacher Zungen fast zur Regel geworden ist, folgende Näherungsgleichung zwischen der Ablation a_z einerseits und der jährlichen Längenänderung $\Delta l'$ der Gletscherzunge andererseits (Bild 5).

$$(5) \quad a_z \sim \Delta l' \cdot (\operatorname{tg} \psi_z - \operatorname{tg} \alpha_z)$$

$$(6) \quad \Delta l' \sim \frac{a_z}{\operatorname{tg} \psi_z - \operatorname{tg} \alpha_z} \quad (\text{m/Jahr})$$

worin bedeuten:

a_z = Ablation am Zungenende (Nähe Gletschertor)

$\operatorname{tg} \psi_z$ = Neigung der Zungenoberfläche vor Beginn der Ablationsperiode

$\operatorname{tg} \alpha_z$ = Neigung der Gletschersohle am Zungenende

Der Näherungscharakter dieser Gleichungen ist dadurch bedingt, dass der vertikale Eisnachschub in A_2' , der durch die plastische Verformung des Eises während der Ablationsperiode

*) «Toter» Zustand im Gegensatz zum stationären Zustand



Bild 6. Fornogletscher, Aufnahme A. Steiner, St. Moritz, ca. 1938

entsteht, vernachlässigt wird, weil er im Vergleich zur Ablation a_z in der Regel klein ist. Andernfalls kann dieser sekundäre Einfluss leicht geschätzt werden.

Da die jährlichen Längenänderungen der alpinen Gletscherzungen seit 75 Jahren an einer grossen Zahl von Gletschern gemessen wurden, ergeben sich auf Grund von Gleichung 6 wertvolle Anhaltspunkte über die Grösse der Ablation für die Perioden maximalen Gletscherschwundes, sofern die speziellen Verhältnisse der betreffenden Zunge genügend genau bekannt sind.

Findet im allgemeinen Fall ein Gleiten der Gletscherzunge auf der Sohle statt ($v_u \neq 0$), so berechnet sich die jährliche Längenänderung der Zunge angenähert wie folgt:

$$(7) \quad \Delta l = \Delta l' - v_{uz} \sim \frac{a_z}{\operatorname{tg} \psi_z - \operatorname{tg} \alpha_z} - v_{uz} \quad (\text{m/Jahr})$$

worin v_{uz} die Gleitgeschwindigkeit am Zungenende bedeutet.

Für die stationäre Gletscherzunge gilt als Spezialfall:

$$(8) \quad \Delta l = 0; \quad v_{uz} \sim \frac{a_z}{\operatorname{tg} \psi_z - \operatorname{tg} \alpha_z} \quad (\text{m/Jahr})$$

Daraus folgt, dass nicht nur ein Gletschervorstoss, sondern auch der stationäre Zustand der Gletscherzunge stets mit einem erheblichen Gleitvorgang der Zunge auf der Gletschersohle verbunden ist, dessen Intensität beim stationären Gletscher der Ablation a_z proportional und damit um so grösser sein muss, je tiefer die betreffende Zunge liegt und je geringer die Schuttbedeckung ist.

Als konkrete Beispiele optimalen Schwundes flacher Gletscherzungen seien einerseits der Rhonegletscher (Bild 2 u. 3) für die Periode maximalen «Rückzuges» (1874—1884) und andererseits der Fornogletscher (Bilder 6 und 7) für die jüngste Periode 1935—1954 betrachtet. Unter der durch verschiedene Beobachtungen begründeten Annahme, dass kein merkliches Gleiten des Zungenendes auf dem Untergrund während den erwähnten Perioden stattgefunden habe, ergeben sich an Hand der gemessenen Verkürzungen $\Delta l'$ die in Tabelle 2 enthaltenen mittleren Ablationen am Gletscherende.

Versucht man andererseits, die am Rhone- und Fornogletscher zu erwartenden Ablationswerte auf Grund der von der hydrologischen Abteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH am Aletschgletscher in den Jahren 1951—1952 in Zusammenarbeit mit der Gletscherkommission durchgeführten Ablationsmessungen [9] abzuschätzen, so

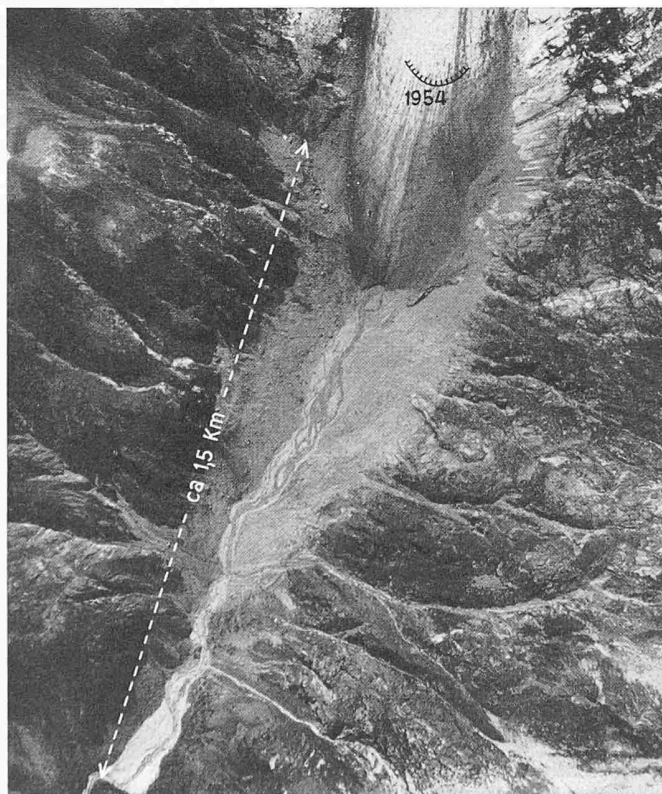


Bild 7. Fornogletscher (Bergell) 1933. Fotogrammetrische Aufnahme durch die Eidg. Vermessungsdirektion Bern, alle Rechte vorbehalten

Tabelle 2

Ablationen a_z , berechnet auf Grund der gemessenen Aenderungen $\Delta l'$ der Zungenlänge, wenn kein Gleiten stattfindet (Gl. 6)

Gletscher	Zunge m ü. M.	Messperiode Jahre	$\Delta l'$ m/Jahr	$\text{tg } \psi_z$	$\text{tg } \alpha_z$	a_z m/Jahr
Rhonegletscher	1780	1874—84	52,0	0,26	0,03	12,0
Fornogletscher	2100	1935—54	25,0	0,40	0,08	8,0

kann man von der einfachen Annahme ausgehen, dass die Ablation proportional mit der Höhendifferenz ΔH_F gegenüber der Firnlinie zunimmt [17]. Rechnet man dabei mit einer Zunahme von rund 1,1 m pro 100 m entsprechend der Gleichung:

$$(9) \quad a_z \sim 0,011 \Delta H_F$$

so ergeben sich für die angenommenen Koten der Firnlinie die in Tabelle 3 aufgeführten Ablationswerte.

Die relativ gute Uebereinstimmung zwischen den auf zwei Wegen ermittelten Ablationswerten, von denen der erste auf der Voraussetzung eines Fehlens der Gleitkomponente beruht, spricht für die Richtigkeit der Annahme, dass in den betrachteten extremen Schwundperioden tatsächlich kein

Tabelle 3

Ablation a_z , berechnet auf Grund von Ablationsmessungen (1951/52) am Aletschgletscher [9]

Gletscher	Firnlinie (geschätzt) m ü. M.	Zunge m ü. M.	Höhen- Differenz ΔH_F in m	a_z nach Gl. 9	a_z nach Tab. 2 Gl. 6
Rhonegletscher	2900	1780	1120	12,3	12,0
Fornogletscher	2800	2100	700	7,7	8,0

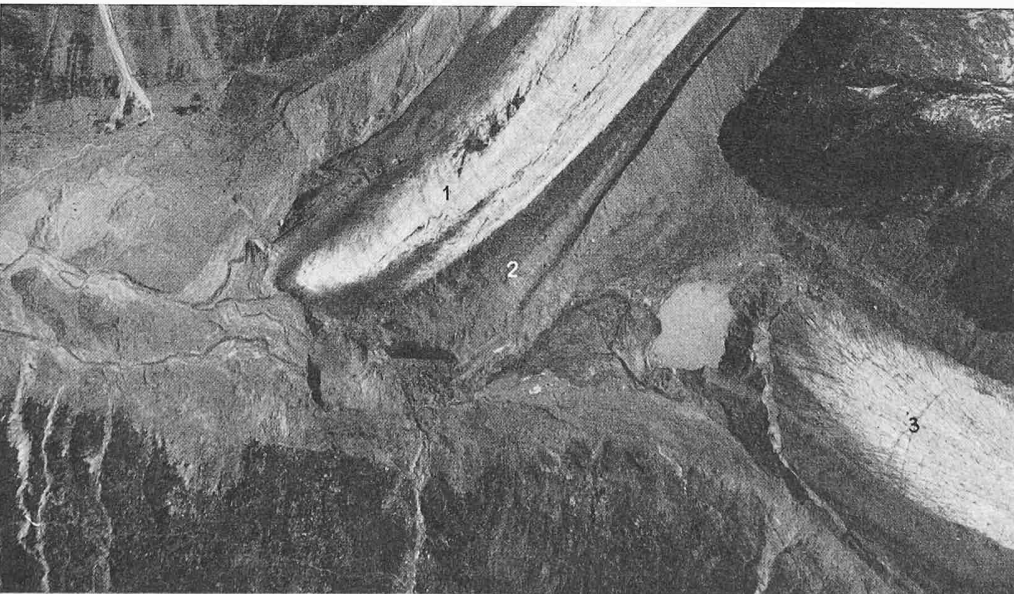
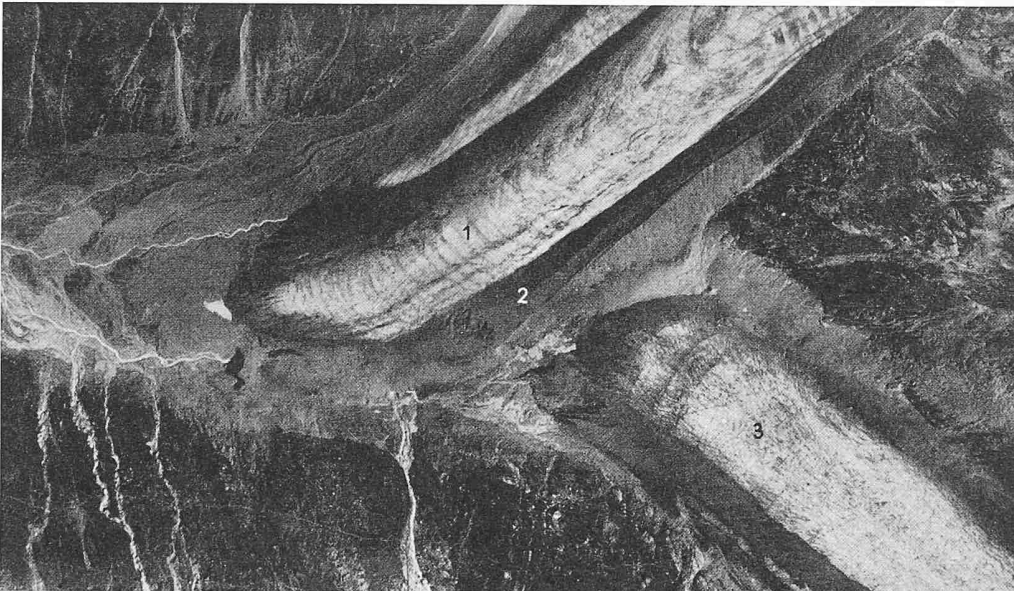
Gleiten des Gletscherendes auf der Sohle stattgefunden hat. Durch Messungen am Fornogletscher im Winter 1954/55 wurde dieses Verhalten wenigstens für die Gegenwart bestätigt. Andererseits konnte am Rhonegletscher um die Jahrhundertwende, als der Schwund weniger intensiv war, ein schwaches Gleiten des Zungenendes von durchschnittlich 4,7 m pro Jahr gemessen werden [1], das deutlich zeigt, wie die Intensität des «Gletscherrückganges» durch die Gleitbewegung beeinflusst wird.

3. Neuere Untersuchungen über den hundertjährigen Gletscherschwund in den Alpen (1856—1955)

Während die älteren Beobachtungen sich vorwiegend auf die Lageänderungen der Gletscherzungen beschränken, gestattet die neue Entwicklung der Kartographie und der Photogrammetrie sowie die Zusammenarbeit mit den an der Gletscherkontrolle interessierten technischen Kreisen und Behörden, auch die Aenderungen der vergletscherten Flächen, die Höhenänderungen der Gletscheroberfläche und die dadurch bedingten Volumenverluste zu erfassen. Schliesslich macht sich die Klimaschwankung auch durch eine entsprechende Verschiebung der Firnlinie geltend, die neuerdings ebenfalls genauer verfolgt wird.

a) Lageänderungen der Gletscherzungen (Situation und Höhe über Meer)

Bei flachen Gletscherzungen, die am ehesten vergleichbare Werte liefern, dürfte die horizontal längs der Stromaxe gemessene Verkürzung während der säkularen Periode, die beim Rhonegletscher rund 2 km betrug, je nach Höhenlage, Exposition usw. zwischen 1,0 und 2,0 km schwanken (Grössenordnung). Wie weiter oben gezeigt wurde, ist bei fehlendem Gleitvorgang die jährliche Verkürzung $\Delta l'$ direkt proportional der Ablation und damit dem Höhenunterschied ΔH_F zwischen Zunge und Firnlinie (vgl. Tabelle 2). Neben optimalen «Rückzugs-Geschwindigkeiten» tiefergelegener Gletscherzungen von über 50 m pro Jahr bildet eine Zungenverkürzung von 25 m pro Jahr, wie sie z. B. beim Fornogletscher als Durchschnitt der Schwundperiode von 1935—54 gemessen wurde,



Bilder 8a und 8b. Tschieravagletscher (1) und Roseggletscher (3). Veränderung der Gletscherzungen (Schwund) von 1935 (oben) bis 1947 (unten). 2 = Toteis. Flugaufnahme Eidg. Landestopographie. Alle Rechte vorbehalten

keine Seltenheit. Auch bei dem unter dem Einfluss des Staubetriebs stehenden Unteraargletscher betrug der durchschnittliche «Rückzug» seit dem Staubeginn (1932—54) 24,6 m/Jahr, in der vorangehenden Periode 1915—31 dagegen nur 11,4 m/Jahr [6]. Wie verschiedenartig sich im übrigen die einzelnen Gletscher verhalten, geht schon daraus hervor, dass selbst in Zeiten intensivsten Schwundes gewisse Gletscher stationär bleiben und andere vorstossen. So stiessen z. B. von den im Jahre 1954 kontrollierten 73 Gletscherzungen 5 bzw. 7 % vor, 3 bzw. 4 % blieben stationär und 65 bzw. 89 % erlitten eine Verkürzung von durchschnittlich 16,5 m [6]. Als «enfant terrible» unter den schweizerischen Gletschern sei schliesslich noch der Glacier de Tsidjore Nuove im Val d'Arolla erwähnt, der im vergangenen Jahrhundert wiederholt vorstoss und 1892—93 eine Vorstosseschwindigkeit von rd. 100 m/Jahr erreichte, während sich sein östlicher Nachbar, der Bas Glacier d'Arolla, während der letzten hundert Jahre fast ununterbrochen um total rd. 1,3 km «zurückzog».

Besonders aufschlussreich ist auch die Aenderung in der Höhenlage der Gletscherzunge, die dem Anstieg der 0°-Isotherme der mittleren Lufttemperatur folgt (vgl. P. L. II/4). Für eine infolge verschiedener Aufnahmedaten nicht ganz einheitliche Periode (durchschnittlich: 1877—1932) hat P. L. Mercanton an 162 Gletschern eine mittlere Hebung der Gletscherzunge von total 109 m in rund 55 Jahren, d. h. eine jährliche Höhenänderung von rd. 2,0 m ermittelt [10].

Das seit rund 100 Jahren von der Gletscherzunge freigegebene Gebiet zeichnet sich bei den meisten Gletschern durch die hellere Farbe der zurückgelassenen Moränen und Felspartien deutlich ab (Bild 7), wobei diese Aenderung im Tonus nicht allein durch den Grad der Verwitterung, sondern vor allem durch gewisse Flechtenbildungen, deren Entwicklung nur langsam fortschreitet, bedingt ist. Vollzieht sich der Rückgang der Gletscherzungen im Vereinigungsgebiet zweier Gletscher, so kommt es bei der Trennung der beiden Zungen infolge Schwund häufig zur Bildung von Moränen-

und Gletscherseen, die zum Teil auf Toteis aufruhren und zu katastrophalen Ausbrüchen führen können (Ferpèclegletscher, Roseggletscher [11] usw.). Zwei in Abständen von zwölf Jahren aufgenommene Flugphotos vom Roseg- und Tschiervagletscher (Bild 8) zeigen deutlich die Bildung eines solchen Moränensees, der zwischen einer durch Moränenschutt vor der Ablation geschützten Toteismasse (2) im Randgebiet des Tschiervagletschers (1) einerseits und der sich infolge ihrer flachen Form rascher zurückziehenden Zunge des Roseggletschers (3) andererseits entstanden ist. Das Durchsägen der Schutt- und Eisbarriere durch Rückwärtserosion führte bekanntlich zu einer Verschärfung der Hochwasserkatastrophe im Engadin vom 21./22. Aug. 1954 [11]. Allgemein stellt im gesamten Alpengebiet die Freigabe des moränenbedeckten, vielfach von Toteis unterlagerten instabilen Geländes durch den Gletscherschwund, in Verbindung mit der übernormalen Abflussmenge, den Flussbau vor schwierige Probleme der Geschiebeführung.

Die Bildung von Toteis erfolgt dadurch, dass diejenigen Teile des Gletschers, die durch Schuttbedeckung gegen intensive Ablation geschützt sind, beim Schwundvorgang vom «lebenden» Gletscher abgeschnürt werden und als isolierte Eismassen um so länger erhalten bleiben, je näher sie der Permafrostgrenze liegen [22]. Nach Prof. R. Staub ist u. a. die Entstehung der Engadiner Seen dem Persistieren einzelner Toteisblöcke zu verdanken, welche die Seebecken vor der Verschotterung durch Seitenbäche bewahrten [23]. Bei der heutigen intensiven Bautätigkeit in der Nähe von Gletscherenden bildet die Feststellung und Lokalisierung von Toteismassen eine besondere Aufgabe des Glaziologen.

Auf die ausserordentlichen Gletscherschwankungen im Zungengebiet, die insbesondere durch die Bildung von Eisdämmen auch in Zeiten eines intensiven Gletscherschwundes eine latente Gefahr darstellen und zahlreiche Katastrophen verursacht haben, kann im Rahmen dieses Aufsatzes nicht näher eingetreten werden [12, 13].

Fortsetzung folgt

Sur le Problème de la Méthode dans les Sciences

Par Ferdinand Gonseth, Dr., Prof. EPF, Zürich *)

1. De la nécessité d'une philosophie

Les sciences et la philosophie ont une origine commune. Les rapports qu'elles entretiennent en restent profondément marqués. Incessamment, la pensée scientifique et la pensée philosophique se croisent et se recroisent. Elles restent liées, elles le resteront sans doute toujours. Elles visent l'une et l'autre à la connaissance que nous pouvons prendre du monde et de nous-mêmes. L'histoire de l'une ne saurait être faite sans jeter à tout moment un regard sur l'histoire de l'autre. Et pourtant, autant que d'une marche côté à côté, leur histoire commune est faite d'un antagonisme profond qui parfois reste caché et qui parfois éclate au grand jour.

A ce propos, le cas de Descartes, grand mathématicien et grand philosophe, mérite d'être médité.

En aucun temps, les philosophes et la philosophie de l'époque n'ont été plus rudement traités que dans le Discours de la Méthode. En 1637, la philosophie scolastique était encore maîtresse de presque toutes les avenues de la connaissance. Voici ce qu'en disait le Discours :

«Puis, pour les autres sciences, d'autant qu'elles empruntent leurs principes de la philosophie, je jugeais qu'on ne pouvait avoir rien bâti qui fût solide sur des fondements si peu fermes...» «...Mais ayant appris dès le collège qu'on ne saurait rien imaginer de si étrange et de si peu croyable qu'il n'ait été dit par quelqu'un des philosophes...»

Descartes conteste ainsi à la philosophie de son temps le droit et le pouvoir de fournir à la connaissance un fondement authentique et assuré. Il lui arrache le privilège de formuler les règles ultimes de la vérité. Mais ne remettra-t-il pas ce privilège en d'autres mains? Revenons au discours.

«...Je me plaisais aux mathématiques, à cause de la certitude et de l'évidence de leurs raisons; mais je ne remar-

quais point encore leur vrai usage, et, pensant qu'elles ne serviraient qu'aux arts mécaniques, je m'étonnais de ce que, leurs fondements étant si fermes et si solides, on n'avait rien bâti dessus de plus relevé.»

«Ces longues chaînes de raisons, toutes simples et faciles, dont les géomètres ont coutume de se servir pour parvenir à leurs plus difficiles démonstrations, m'avaient donné l'occasion de m'imaginer que toutes les choses qui peuvent tomber sous la connaissance des hommes s'entresuivent de la même façon, et que, pourvu seulement qu'on s'abstienne d'en recevoir aucune pour vraie qui ne le soit, et qu'on garde toujours l'ordre pour les déduire les unes des autres il n'y en peut avoir de si éloignées auxquelles enfin on ne parvienne, ni de si cachées qu'on ne découvre.»

Seules, les mathématiques émergent finalement du doute systématique qu'il étend, par méthode, à l'ensemble des connaissances. Les évidences sur lesquelles elles se fondent et la façon dont elles en font de longues chaînes sont seules à offrir des garanties suffisantes à celui qui entreprend de découvrir la vérité dans les sciences.

Descartes nous apparaît ainsi tout d'abord sous les traits du savant qui reprend à la philosophie le droit de légiférer utilement sur les sciences particulières. (Les mathématiques, qui n'étaient pas encore engagées dans la grande aventure du calcul infinitésimal, représentaient d'ailleurs, à ce moment-là, le seul exemple d'une discipline scientifique constituée.) Il oppose tout spécialement à la prétention d'universalité de la philosophie la valeur spécifique du raisonnement mathéma-

*) Nous remercions tout spécialement l'auteur qui avait déjà collaboré en 1930 à notre cahier du 75e anniversaire de l'EPF, par son article «Les mathématiques et la réalité.»