

Ausgangsformen für Penitentes gestoßen. Im Juli des Jahres 1935 lagerte eine Antizyclone dauernd quer über den Alpen und brachte Perioden mit trockenem, ruhigem Strahlungswetter, also eine der Bedingungen zur Bildung von Penitentes. Der ungewöhnliche Anblick unzählbarer kleiner Höcker auf der Firnoberfläche im Claridenmassiv veranlaßte mich zur Aufnahme des Bildes 1. Noch außergewöhnlicher war die Firnoberfläche am Casnil im Bergell, am 1. August des gleichen Jahres 1935 (Bild 2). Da waren richtige kleine Penitentes von 30 bis 40 cm Höhe, etwas gegen Süden geneigt, hart gefroren, was die Überschreitung sehr mühsam gestaltete. Ich schrieb darüber und über andere Schneeformen in der Zeitschrift des Schweizer Alpenclubs, „Die Alpen“, Heft 2, 1936. Ich glaubte damals noch in der „knolligen Struktur“ des Firnes die Grundursache sehen zu müssen, habe diese Ansicht jedoch wieder aufgegeben, besonders seit ich mich mit den Strukturböden in den Alpen beschäftigt habe (Geographica Helvetica, Vol. 1, 1946, Heft 2). Bei den Strukturböden spielen die Druckkräfte beim rhythmischen Gefrieren und Auftauen wasserhaltiger Böden die Hauptrolle. Wenn da bei feinkörnigen Erdböden die Wasserschicht zwischen den Körnern beim Eintrocknen hauchdünn wird, treten Kapillarkräfte auf und bewirken die Schrumpfung um Zentralpunkte herum. Es entstehen die bekannten Trockenrisse, die Polygonböden. Ich überlegte mir, ob auf einer feinkörnigen Firnoberfläche nicht Ähnliches stattfinden könnte, nur in entgegengesetztem Sinne? Während des Tages breitet sich unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung eine dünne Schmelzwasserschicht aus, welche dann nachts infolge der Ausstrahlung zu Eis erstarrt. Die von den vielen Kristallisationzentren radial ausgehenden Eisteilchen stoßen aneinander und behindern sich gegenseitig an der horizontalen Ausbreitung. Weil Eis größeren Raum beansprucht als Wasser, müssen in der Richtung der Firnfläche Druckkräfte auftreten. Diese bewirken die Aufwölbung kleiner Kuppeln oder kleiner Wannen (Fig. 1), jede getrennt von der benachbarten durch feine Risse, so daß die ganze Firnoberfläche ein Polygonnetzwerk bildet. So denke ich mir die Entstehung der Embryonalformen für die künftigen Penitentes.

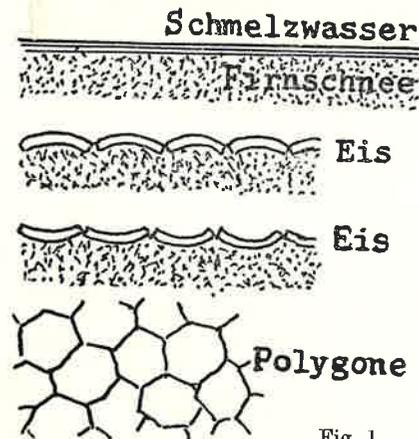


Fig. 1

Eingelangt Ende Dezember 1954.

Anschrift des Verfassers: Dr. R. Streiff-Becker, Zürich 44, Kantstraße 11.

## Über den nächtlichen Wärmeumsatz der gefrorenen Gletscheroberfläche

Von W. Ambach, Innsbruck

In einer kürzlich erschienenen Abhandlung<sup>1</sup> werden Messungen der nächtlichen Energiebilanz einer gefrorenen Gletscheroberfläche diskutiert. Die Beobachtungen wurden gleichzeitig mit den von H. Hoinkes während des Tagabschnittes durchgeführten Untersuchungen über die Energiebilanz der Gletscheroberfläche im Juli/August 1952 am Vernagtferner (Ötztaler Alpen, 3000 m) durchgeführt. Die Abkühlung des Eises in Strahlungsnächten wurde thermoelektrisch gemessen. Vertikal in den Gletscher gebohrte Thermolemente zeigten in klaren Nächten eine Abkühlung des Oberflächeneises bis zu  $-3,5^{\circ}\text{C}$ . Im Gletscher kann der Temperaturverlauf weitgehend linear genähert werden. Der Nachtfrost dringt auch in wolkenlosen Nächten kaum tiefer als 15 bis 20 cm in den Gletscher ein. Als wesentliches Merkmal der Energiebilanz der gefrorenen Gletscheroberfläche zeigt sich, daß Schmelzwasser, welches im Eise eingeschlossen ist, beim Frieren eine erhebliche Wärmequelle darstellt (freiwerdende Schmelzwärme). Der durch das Schmelzwasser gelieferte Beitrag zur Energiebilanz der Oberfläche ist in der Größenordnung der Wärmemenge, die gleichzeitig durch Konvektion aus der Luft zugeführt wird. Diese Tatsache ergibt sich aus der Überlegung, daß der Wärmestrom, der aus dem Gletscher fließt, gleich groß sein muß wie der Abkühlungsbetrag des Eises (etwa  $10\text{ cal cm}^{-2}/\text{Nacht}$ ) und der freigewordenen Schmelzwärme zusammen. Daraus wurde der Schmelzwassergehalt des Eises zu  $0,026\text{ g cm}^{-3}$  geschätzt. Es ist bemerkenswert, daß einer so geringen Wassermenge eine so große Bedeutung im nächtlichen Wärmeumsatz zukommt.

Der Zusammenhang zwischen effektiver Ausstrahlung, die den größten Einfluß auf die nächtliche Abkühlung hat, und der Bewölkung wurde während des Nachtabschnittes beobachtet. Der gefundene Zusammenhang kann durch eine quadratische Beziehung, wie sie schon H. Hoinkes 1950 gefunden hatte, angenähert werden.

Die Anteile der einzelnen physikalischen Prozesse an der Energiebilanz werden in zwei Tabellen wiedergegeben. Der fühlbare und latente Wärmestrom wurde mit der Methode von H. Hoinkes berechnet.

Tabelle I:	26./27. 7.	29./30. 7.	30./31. 7.
effektive Ausstrahlung	-42	-50	-47
fühlbarer Wärmestrom	15	18	18
latenter Wärmestrom	1	0	-3
Schmelzwärme	11	20	18
Abkühlung berechnet	-15	-12	-14
Abkühlung gemessen	-11	-9	-11

Angaben in  $\text{cal cm}^{-2}/\text{Nacht}$ .

Tabelle I zeigt die Verhältnisse in Frostnächten, d. h. in Nächten mit negativer Gesamtbilanz, die in der Tabelle als „berechnete Abkühlung“ erscheint. Die gemessene Abkühlung des Eises stimmt damit befriedigend überein.

<sup>1</sup> Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Ser. A, Bd. 8, 411—426, 1955.

Tabelle II:	Mitteilungen	27./28. 7.	31. 7./1. 8.	2./3. 8.
effektive Ausstrahlung		-34	-15	-31
fühlbarer Wärmestrom		24	11	23
latenter Wärmestrom		13	4	-6
Schmelzwärme		0	8	14
Niederschlag		2	1	3
Abkühlung		0	0	-2
Ablation berechnet, mm Wasser		0,6	1,1	0,6
Ablation gemessen, mm Wasser		1,3	1,2	0,9

Angaben in  $\text{cal cm}^{-2}/\text{Nacht}$ .

Tabelle II enthält zum Vergleich die umgesetzten Energiebeträge in Nächten mit positiver Gesamtbilanz. Als besonderes Beispiel sei die Nacht 2./3. 8. hervorgehoben. Eine vor Mitternacht eingetretene Abkühlung des Eises wurde nach Mitternacht dadurch wieder rückgängig gemacht, daß eine aufkommende Wolkendecke die effektive Ausstrahlung stark verminderte und damit die konvektiv zugeführte Wärme den bereits vorhandenen Frost kompensieren konnte.

Es wurde der Versuch unternommen, den gegen den Sonnenaufgang verspäteten Beginn des Schmelzprozesses an der Oberfläche mit der Durchlässigkeit des Gletschereises für sichtbare Strahlung auch zahlenmäßig durch Anwendung der Wärmeleitungsgleichung zu klären. Die Lösung, die zuerst für eine mit der Zeit linear veränderliche Strahlungsintensität gefunden wurde, konnte auf eine allgemeine, beliebig gegebene Funktion erweitert werden. Das Ergebnis hängt weitgehend von der Annahme des Absorptionskoeffizienten des Gletschereises ab. Messungen der Strahlungsdurchlässigkeit des Gletschereises wurden im Sommer 1955 im Zuge eines größeren, von H. Hoinkes geleiteten Arbeitsprogrammes am Hintereisferner aufgenommen. Die Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.

*Anschrift des Verfassers:*

*Dr. Walter Ambach, Innsbruck, Physikalisches Institut, Schöpfstraße 41*

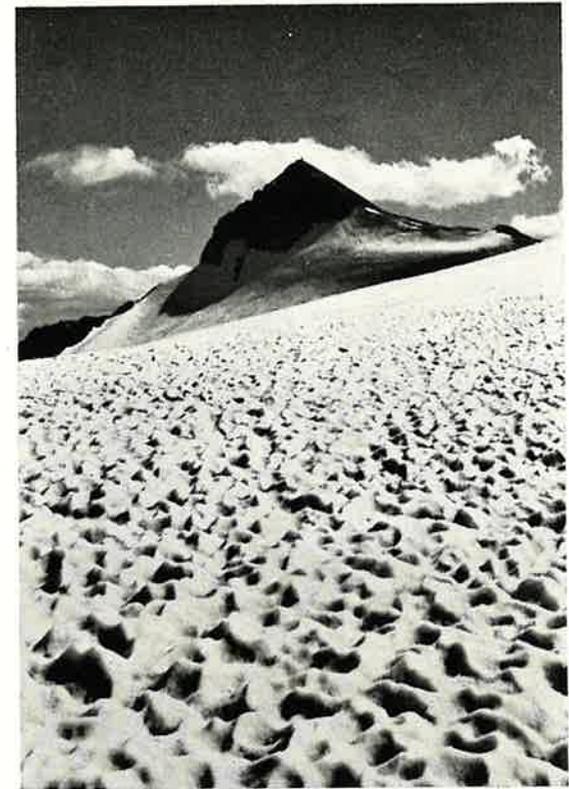


Bild 1. Firnoberfläche im Clariden-Massiv Juli 1935 (vgl. S. 246)



Bild 2. Firnoberfläche am Casnil im Bergell 1. August 1935 (vgl. S. 246)