

75. *E. Trojan*, Das Klima Nordkoreas auf Grund der japanischen Wetterbeobachtungen der Jahre 1914—1933., Unvollendete Greifswalder Dissertation.
76. *Chang Wang Tu*, China Rainfall and World Weather. Mem. R. Met. Soc. IV, Nr. 38. London 1934.
77. *Chang Wang Tu*, Some regional Rainfall Types of China. Mem. Nat. Research Inst. Met. V, 1935. 25 S.
78. *Chang Wang Tu*, Climatic Provinces of China. A new Map. Mem. Nat. Research Inst. Met. VIII, 1936. 22 S.
79. *Chang Wang Tu*, On the Relation between the great Flood of 1931, the Drought of 1934 and the Centers of Action in the Far East. Mem. Nat. Research Inst. Met. X, 1937. S. 35—49.
80. *Chang Wang Tu*, A preliminary Study on the mean Air Currents and Fronts of China. Mem. Nat. Research Inst. Met. XI, 3. 1937. 12 S.
81. *Chang Wang Tu*, The Air Masses of China. Mem. Nat. Research Inst. Met. XII, 2. 1938. 50 S.
82. *Chang Wang Tu*, Chinese Air Mass Properties. Quart. Journ. R. Met. Soc. 65, 1939. S. 33—51 (identisch mit Teil I von 81).
83. *Chang Wang Tu* und *Sze-Sung Wang*, Advance and Retreat of the Summer Monsoon in China. Bull. Am. Met. Soc. 1945, S. 9—22.
84. *A. Wagner*, Zur Aerologie des Indischen Monsuns. Gerlands Beitr. z. Geophysik 30, 1931. S. 196—238.
85. *Ward-Brooks-Connor*, The Climate of North America. Handb. d. Klimatologie von *Köppen-Geiger*. Bd. II J.
86. *W. Werenskiöld*, Mean monthly Air Transport over the North Pacific Ocean. Geofysiske Publ. II, 9. Christiania 1923.
87. *H. von Wißmann*, Begleitworte zu einer Niederschlagskarte von China. Zeitschr. Ges. Erdkde, Berlin 1937. S. 38—43.
88. *H. von Wißmann*, Mean Variability of annual Rainfall in Eurasia. Mem. Nat. Research Inst. Met. XI, I. 1937. 21 S.
89. *A. Woelkef*, Über das Klima von Ostasien. Met. Zeitschr. 1870, S. 39.
90. *T. Yamanaka* und *C. Ikeda*, The 3 principal Air Masses in Japan and their Neighbourhood. Journ. Met. Soc. Japan, 2. Ser. 17, 1939.
91. Kinnen ni okeru Chösen no fusuigai (Wind- und Wasserschäden in Korea). Generalgouvernement Korea, Wetterbüro. 1926. 264 S. (jap.).
92. Chösen kasen chösa sho (Buch über die hydrographischen Verhältnisse in Korea). Generalgouvernement Korea. 1929. 3 Bde. (jap.).

SCHMELZUNG UND VERDUNSTUNG VON EIS UND SCHNEE IN IHREM VERHÄLTNIS ZUR GEOGRAPHISCHEN VERBREITUNG DER ABLATIONSFORMEN

C. Troll

Mit 2 Abbildungen

Im Zusammenhang mit vergleichenden Studien zur Physiographie und Biogeographie der Hochgebirge der Erde hat der Verfasser während der Kriegsjahre eine Monographie veröffentlicht¹⁾, die die Ablationsformen von Schnee und Eis, ganz besonders die in der Weltliteratur als Penitentes bezeichneten Formen der Schneefläche subtropischer und tropischer Gebirge über die Erde verfolgt. Es wurde dabei versucht, alles bis dahin bekannte Beobachtungsmaterial mit eigenen Erfahrungen zu einer gesamtirdischen Schau des Phänomens zu verarbeiten. Für die eigenartigen Schichtungen und Oberflächenformen bestimmter Gletscher des Karakorum und des argentinischen Plomogebietes, die ebenfalls mit solchen Ablationsvorgängen auf eine noch nicht endgültig geklärte Weise in Zusammenhang stehen, wurde noch eine ergänzende Darstellung an anderer Stelle gegeben²⁾. Durch weitere Studien in der seither zugänglich gewordenen Literatur hat sich noch ergänzendes Material gefunden, das zur Abrundung des geographischen Gesamtbildes beizutragen vermag und namentlich zu weiteren Beobachtungen anregen kann, um die noch so wenig bekannte regionale Verteilung der Ablationsbedingungen der Gletscher und Schneedecken klären zu helfen. Auf die in dem

Werk von 1942 genannten Arbeiten (203 Nummern) soll dabei nicht mehr zurückgegriffen werden. Für die Hilfe bei der Auffindung der neuen Quellen zum Penitentes-Problem habe ich ganz besonders Herrn Professor *H. Kinzl*-Innsbruck, weiter Professor *E. v. Drygalski* †-München, *H. Gams*-Innsbruck, *R. Lütgens*-Hamburg und *E. Dittler*-Wien zu danken.

1. Ablationsformen

Unter den vielen kleineren und größeren Formen, die an der Oberfläche von Schnee und Gletschern entstehen können, gibt es eine besondere Gruppe von Abtragsformen, die auf die zehrende Wirkung der Sonne und der Atmosphäre zurückgehen, also auf die Ablation. Wenn sie keine Beziehungen zu anderen Voraussetzungen, zur Gletscherstruktur, Gletscherbewegung, zum Lawinenabtrag, der Schmelzwassererosion oder der Windabwehung haben, wollen wir sie Ablationsformen nennen. An solchen Formen können die verschiedenen Elemente der Ablation, warme, besonders bewegte Luft, Kondensationsschmelzung, Sonnen- und Himmelsstrahlung mit schmelzender oder verdunstender Wirkung beteiligt sein. Wenn wir von Strah-

lungsablation sprechen, so soll damit kein scharfer Trennungsstrich gezogen werden, aber es soll das Augenmerk auf eine ganze Serie von Eis- und Schneeformen gerichtet werden, die besonders markant sind und von denen wir heute wissen, daß bei ihnen selektive Sonnenstrahlung den Ausschlag gibt.

Die gesamten Formen dieser Art haben wir eingeteilt in „Formen der bedeckten Ablation“, bei denen die selektive Ablation durch auflagernde Fremdkörper verursacht wird und „Formen der freien Ablation“, bei denen diese ohne Beteiligung von Fremdkörpern vor sich geht. Zu den Formen der freien Ablation gehören die echten Penitentes, die in wenigstens 90% der Fälle aus jahreszeitlichem Schnee unterhalb der Firngrenze gebildet werden („annuelle Penitentes“), in den Subtropen aus Winterschnee im Laufe des Frühjahrs oder Sommers („ganzsommerige Penitentes“), in bestimmten Tropengebirgen mit einer länger liegenbleibenden Decke von Regenzeitschnee oder aus lokalen Schneeanhäufungen auch in kürzerer Zeit, innerhalb weniger Wochen. Daneben gibt es allerdings auch in der Firnregion echte Penitentes, die sich nach Beobachtungen *Helblings* in den argentinischen Kordilleren im Hochsommer auf Firnschnee bilden, die dann die winterliche Schneeverhüllung überdauern, sich im folgenden Hochsommer weiterbilden und so zu ausdauernden (perennierenden) Penitentes werden können. Sie erleiden dabei auch eine Materialmetamorphose von Schnee- über Firn- zu Eispententes.

Die Zacken und Pfeiler der Penitentes sind Vollformen, die erst sekundär dadurch entstehen, daß schalenförmige, später grubenförmige Vertiefungen zusammenwachsen und daß die sich erhöhenden Scheidewände zwischen ihnen zu Pfeilern isoliert werden. Die Schalen und Gruben („snowcups“ und „snowpits“ der Amerikaner, in ihrer Gesamtheit auch als „honeycombed snow“ oder „Wabenschnee“ bezeichnet) als Anfangsstadien der Penitentesbildung gehören also gleichfalls zu den Formen der freien Ablation. Ähnliche Formen, die sich nicht zu Penitentes weiterentwickeln und nur schalig-muschelige Hohlformen bleiben, die mit einem polygonalen Kantennetz aneinanderstoßen, hält *v. Klebelsberg*³⁾ für rhythmische Schmelzformen unter Windeinfluß. Sie treten auch in höheren Breiten und an sehr geschützten Stellen auf (Gletschertore, steile Schneewände), wo immerhin noch die diffuse Strahlung gleichmäßig wirken kann. Hier liegt offenbar ein Fall vor, wo verschiedene Ursachenkombinationen ähnliche Wirkungen erzeugen können.

Bei den Formen der bedeckten Ablation gibt es zwei Fälle. Wenn auflagernde Fremdkörper

von feinkörniger Beschaffenheit und dünn gestreut sind, verstärken sie die Strahlungsabsorption, und es entstehen Ablationshohlformen, z. B. Kryokonitlöcher, Mittaglöcher, Staublöcher. Wenn aber größere Auflagerungen abschirmend wirken, so bilden sich Ablationsvollformen, z. B. Gletschertische, Ablationskegel, Sandkegel, Schmelzkegel. Schließlich können auch die Ablationshohlformen der bedeckten Ablation so dicht gedrängt sein, daß zwischen ihnen nur einzelne „Zeugen“ des normalen Ablationsniveaus stehen bleiben.

Die Formen der bedeckten Ablation haben einen viel weiteren klimatischen Spielraum als die echten Penitentes, ja sie sind gerade auch aus arktischen Gebieten besonders häufig beschrieben worden. Die Kryokonitlöcher im engeren Sinn, die sehr tiefen, regelmäßigen und vertikal eingesenkten Staublöcher, wie sie aus Grönland durch *A. E. Nordenskjöld* und *E. v. Drygalski* beschrieben und später von *O. Steinböck* auch biologisch untersucht wurden, sollen nur in der Polarzone, in Grönland bis 68° südwärts verbreitet sein. Aber ähnliche Formen der bedeckten Ablation, die Mittaglöcher und Staublöcher, fehlen auch in den wärmeren Zonen nicht, und die Gletschertische, die in den Alpen, im Karakorum, in Argentinien und anderwärts so alltäglich sind, sollen gerade in niederen Breiten besonders hoch ausgebildet sein⁴⁾. Auch *H. Kinzl* bestätigt mir, daß in den Kordilleren Mittelperus Gletschertische mit Neigung nach Norden zahlreich sind und daß Kryokonitlöcher auf dem Llaca-Gletscher oberhalb Huaráz eine Tiefe von 2 dm erreichten. In den Alpen hat in den Sommern 1942—1944 *Ingeborg Pascal* erstmals systematisch die Kryokonitlöcher untersucht, z. T. experimentell mit künstlichem Kryokonit unter gleichzeitiger Beobachtung der Ablation und der Witterungsverhältnisse⁵⁾. Sie zeigten im Laufe des Sommers abwechselnd Eintiefung bei Strahlungswetter und Ausschmelzung bei trübem Wetter oder Föhn. Zum Einschmelzen genügen schon geringe Strahlungsenergien, die das Eis selbst wenig angreifen. Die Zone gut ausgebildeter Kryokonitlöcher wandert während des Sommers am Gletscher höher hinauf.

2. Die verschiedenen Ablationsvorgänge und ihr Anteil an der Gesamtablation

In einer älteren Arbeit hat *H. Philipp*⁶⁾ auf Grund von Beobachtungen im arktischen Spitzbergen sich mit den Ablationsverhältnissen arktischer Gletscher befaßt, kam aber zum Teil zu Schlußfolgerungen, die heute unhaltbar geworden sind. Er erkannte, daß die Kryokonitlöcher durch Absorption der strahlenden Wärme ent-

stehen, die in der Lage ist, durch das „diatherme“ Eis zu dringen, noch tief in das Eis eingesenkte Steinchen zu erwärmen und zum Schmelzen des Eises zu veranlassen. Die indirekte Schmelzung durch Insolation nannte er „indirekte Ablation“ und an anderer Stelle auch „Insolationsablation“ und stellte sie der direkten Ablation infolge erhöhter Lufttemperatur gegenüber. Ob bei dieser Kryokonitablation das diffuse Himmelslicht maßgebend ist, wie O. Steinböck⁷⁾ annimmt, oder die schräg durch das Eis eindringende direkte Strahlung, also das direkte Sonnenlicht, wie A. Wagner⁸⁾ gegen ihn geltend machte, ist zunächst wohl schwer zu entscheiden. Wahrscheinlich ist die gesamte Strahlung in Rechnung zu setzen. Philipp kannte nur zwei Formen der Ablation, die mit Hilfe eines absorbierenden Mediums vor sich gehende Strahlungsablation, die zur Schmelzung führt, und die ohne ein solches Medium erfolgende einfache Schmelzungsablation. Stillschweigend nahm er an, daß die Insolation immer nur indirekt über ein absorbierendes Medium wirken könne und setzte indirekte und Insolationsablation gleich. Daß Ablation auch durch direkte Verdunstung erfolgen kann, war ihm offenbar gar nicht gegenwärtig, das Wort „Verdunstung“ kommt in seiner Abhandlung überhaupt nicht vor. Direkte Verdunstung aber wird ihrerseits durch starke Insolation (auch bei kalter Luft) und durch trockene, besonders stark bewegte Luft gefördert. Gerade in niederen Breiten und in den Trockengebieten, aber auch in großer Meereshöhe spielt sie oft eine bedeutende, ja überwiegende und, wie wir noch sehen werden, u. U. fast alleinige Rolle. Die eigenartigen Formen der freien Ablation, die Penitentes, gehen so gut wie ganz auf ihr Konto. Philipps Begriff „indirekte Ablation“ sollte physiognomisch das gleiche bedeuten wie unsere „bedeckte Ablation“, die auch schmelzende Strahlungsablation ist. Aber da er sie der Strahlungsablation schlechtweg gleichsetzte, ist der Begriff terminologisch zweideutig und nicht mehr gut verwendbar.

Die modernen skandinavischen Ablationsforscher, A. Angström, H. U. Sverdrup und H. W:son Ahlmann suchen die Gesamtablation messend und rechnerisch in folgenden Einzelanteilen zu bestimmen:

1. Ablation auf Grund der Einstrahlung,
 - a) in Form der Schmelzung,
 - b) in Form der direkten Verdunstung;
2. Ablation auf Grund meteorologischer Bedingungen,

- a) Wärmeleitung der Luft,
- b) Wärme durch Wasserdampfkondensation.

Dabei sind unter den meteorologischen Bedingungen auch Regen und Schmelzwasser einbegriffen. Die Wasserdampfkondensation wirkt sich durch die Taubildung aus, die beträchtliche Schmelzwirkung im Gefolge hat. - A. Heim hat gemessen, daß Tau die siebenfache Gewichtsmenge Eis zu schmelzen vermag. Schon seit 100 Jahren (Agassiz 1847!) hat man auf den Alpengletschern festzustellen versucht, ob bei dem Wasseraustausch zwischen der Schnee- und Eisoberfläche und der Luft Verdunstung oder Kondensation überwiege. Für die größeren Höhen und besonders für die Winterzeit haben die Messungen von Dufour-Forel⁹⁾ über Billwiller¹⁰⁾ bis Monterin¹¹⁾ eine immer größere Bedeutung der Verdunstung erkennen lassen. Zur Kondensation in Tauforn steht aber auch die Kondensation in fester Form, also die Sublimation, im Gegensatz. Sie ist das volle Gegenstück zur direkten Verdunstung und kann in Form von Raureifbildung auch stark an der Ernährung der Gletscher beteiligt sein¹²⁾. Dies ist besonders von feuchtkühlen Gletschergebieten des Nordens (Sarek, Jotunheimen) bekannt, aber auch an den höchsten, von Lawinenrillen gefurchten Kämmen des Himalaya¹³⁾ und der peruanischen Anden beobachtet. Außerdem kann sich bei der Penitentesbildung in ganz trockener Luft die direkte Verdunstung des Schnees im Tagesgang zum Teil wieder in Sublimation umkehren und an den Flanken der Penitentes Reif zum Niederschlag bringen.

3. Die Ablationsverhältnisse der Gletscher arktischer und gemäßigter Breiten

Die von M. Conway und H. Philipp gemachte Beobachtung, daß in Spitzbergen mit der Meereshöhe die Kryokonitlöcher immer häufiger, größer und breiter werden und daß sich als Folge dieser Kryokonitablation erst in größerer Höhe Schmelzwasser, Seen und Bäche auf der Gletscheroberfläche bilden, ist mit Philipp aus der mit der Meereshöhe wachsenden Strahlung zu erklären. Aber nicht haltbar ist seine Folgerung, daß die arktischen Gletscher in erster Linie durch indirekte (also Strahlungs-) Ablation, die der gemäßigten Zone vor allem durch direkte Ablation schmelzen und daß infolgedessen die Ablation der arktischen Gletscher mit der Meereshöhe wachse. Die Gesamtablation nimmt auch bei den arktischen Gletschern mit der Meereshöhe ab. Die Norwegisch-Schwedische Spitzbergen-Expedition unter Leitung von H. W:son Ahlmann¹⁵⁾ hat für den Gletscher des 14. Juli durch die Beobachtungen eines Sommers (26. Juni bis 15. August)

mit dem Ablatographen Deviks an einem Profil vom Meeresspiegel bis zum Isachsenplateau bis fast 1000 m Höhe eine Abnahme der Ablation von 3,00 m am Meeresniveau auf 0,44 m in der obersten Stufe erwiesen. Von dieser Gesamtablation entfallen am Isachsenplateau auf die Strahlungsablation 55,9 % (davon 52,4 % auf Schmelzung und nur 3,5 % auf direkte Verdunstung), die restlichen 44,1 % auf die Schmelzung durch die Lufteinwirkung, und zwar davon 29,4 % auf die Lufttemperatur, 14,7 % auf Wasserdampfkondensation. Gegen den Meeresspiegel nimmt der relative Anteil der Strahlung an der Ablation beträchtlich ab. Bei 600 und 300 m Höhe bestritt sie nur 35 %, am Meeresspiegel nur 24 % der Gesamtablation. Bei den warmen Meeresluft ausgesetzten aktiven Gletschern des südöstlichen Island sinkt nach *Ablmanns* späteren Messungen¹⁵⁾ der Anteil der Insolation an der Ablation unterhalb 200 m Meereshöhe sogar auf 10—20 % ab, erst an der Firnlinie bei 1150 m beträgt er wieder 40 %. *Sverdrup* nimmt dabei an, daß der relative Anteil der Strahlung im Laufe des Sommers von nahezu 100 % im Mai und Juni auf nahezu 0 % Ende August-September absinkt. Nach seiner schematischen Skizze würden am Gletscher des 14. Juli Strahlung und Luftwirkung gegen Ende Juli sich in allen Höhenstufen die Waage halten. Die oben angegebenen Zahlen stellen tatsächlich beobachtete Werte dar. Schon auf Schnee und Gletschereis sind wegen der verschiedenen Albedowirkung die Anteile der Strahlung verschieden. Auflagernde dunkle Körper aber absorbieren fast die gesamte Strahlung und setzen sie bei geringer Wärmekapazität in Schmelzwärme um. Jedenfalls sind die starken Wirkungen der bedeckten Ablation in arktischen Breiten ohne weiteres verständlich, sowohl der Kryokonitlöcher als auch der so häufig aus hohen Breiten beschriebenen Ablationskegel und Staubkegelfelder (Spitzbergen, Island, Nordostgrönland, Nowaja Semlja, Nordskandinavien), zu denen noch zwei Beispiele nachzutragen sind¹⁶⁾.

Da in niedrigeren Breiten die Meereshöhe der Gletscher ansteigt, ist nach *Ablmanns* Regel schon für die Ablation der Alpengletscher mit einem höheren Anteil der Strahlung zu rechnen. Von den Ablationsmessungen, die *U. Monterin* am Lys- und Borsgletscher des Monte Rosa-Gebietes ausgeführt hat¹⁷⁾, und zwar an mehreren Punkten in Höhen von 2350 m bis 4560 m mit Hilfe von Ablatometern und Ablatographen, weisen viele Punkte auf die große Bedeutung der Strahlung hin. Z. B. ist nach ihm bei gleicher Lufttemperatur die Ablation zu Beginn des Sommers, also bei hohem Sonnenstand, viel höher als im September oder Oktober. An heiteren Tagen ist die Stärke der Ablation in enger Ab-

hängigkeit von der Sonnenhöhe, nicht von der Lufttemperatur. Die Messungen am Lysjoch (4280 m) und auf Punta Gnifetti (4560 m) ließen ihn versichern, daß in diesen Höhen die Ablation an heiteren Tagen weitergeht, auch wenn die Lufttemperatur mehrere Grade unter dem Gefrierpunkt liegt, in diesem Falle nur durch direkte Verdunstung. *H. Maurer*¹⁸⁾ war schon viel früher bei Untersuchungen über die jungen Gletscherschwankungen auf den ausschlaggebenden Einfluß der Sonnenstrahlung auf den Haushalt der Alpengletscher geführt worden. Seine in Zürich angestellten Schmelzversuche in Sonne und Schatten, mit Hilfe bekannter Werte (Höhenzunahme der Strahlung, Messungen von Davos) auf die Firnlinie extrapoliert, führten ihn zu dem Ergebnis, daß der Gesamteffekt der Strahlung (Sonnenstrahlung + diffuse Strahlung) an der Ablation mehr als den der übrigen Agenzien zusammen, nämlich 65 bis 70 % ausmache.

Noch stärker als für die ganze Strahlungsablation muß sich der Einfluß der geographischen Breite und der Klimagürtel auf den Anteil der Ablation auswirken, der auf die direkte Verdunstung entfällt. In polaren Breiten ist der Anteil verschwindend klein, wie die Messungen *Ablmanns* auf dem Isachsen-Plateau gezeigt haben (3,5 %). Auf dem Frøyagletscher auf der Clavering-Insel in Ostgrönland, wo *Ablmann* vom 1. bis 14. August 1939 Messungen in 453 m ü. M. anstellte, ist das Klima sehr kalt und trocken, die Ablation infolgedessen sehr niedrig. Aber auch von dieser geringen Gesamtablation von 15,2 cm entfiel nur der minimale Bruchteil von 0,3 cm auf die direkte Verdunstung¹⁹⁾. Es ist daher voll auf verständlich, daß auch die Formen der freien Ablation, der echte Büßerschnee, in höheren Breiten vollständig fehlen. Das nördlichste regelmäßige Vorkommen am Mt. Rainier bei 46° 50' n. Br. ist an das spezifische Verdunstungsklima dieses weit über die Wolkenstufe in die trockene freie Atmosphäre aufragenden Vulkankegels gebunden. In Europa treten bei besonders günstigen Wetterlagen ausnahmsweise niedrige Penitentesfelder auf (nördlichstes Beispiel von 54° 15' in Westpreußen beschrieben), und in den Anden ist die Südgrenze der Penitentes bei 37° gelegen.

4. Verdunstungsablation und Penitentesbildung

Gut ausgebildeter und regelmäßig wiederkehrender Büßerschnee ist, wie ich 1942 eingehend begründet habe, an die niederen, subtropischen und tropischen Breiten, an große Meereshöhe und außerdem natürlich an Klimate gebunden, in denen überhaupt jahreszeitliche Schneedecken entstehen, was in den Gebirgen niedriger Breiten nicht immer der Fall ist. Aber

diese Bedingungen allein sind noch längst nicht ausreichend, sonst wären Penitentes viel allgemeiner verbreitet. Sie erfordern ganz bestimmte physikalische Bedingungen der Ablation. Penitentes sind eine Form der Verdunstungsablation, der direkten Verdunstung von Schnee, manchmal auch von Firn oder Eis, während der Schmelzprozeß allgemein zum Abbau und zur schnellen Zerstörung der Penitentes führt. Für eine so ausgesprochene Verdunstungsablation sind außerdem nötig eine regenlose Jahreszeit, starke, ungehinderte Sonnenstrahlung, also Wolkenlosigkeit, und große Meereshöhe, Lufttrockenheit, große Differenzen zwischen Luft- und Strahlungstemperatur sowie Frosttemperaturen auch bei Tage, wenigstens an der verdunstenden Schneefläche, was wieder bei höherer Lufttemperatur nur bei gleichzeitig sehr großer Psychrometerdifferenz möglich ist. Nach *W. Knoche* ist neben der Lufttrockenheit und dem geringen Luftdruck großer Meereshöhen auch die Windbewegung an dem Zustandekommen hoher Verdunstungsablation entscheidend beteiligt²⁰).

Die Rolle der direkten Verdunstung hat — was hier nachzutragen ist — auch *François E. Matthes*, der schon 1914 und wieder 1928 den Wabenschnee des Mount Rainier beschrieben hatte, später in aller Klarheit erkannt und ausgesprochen²¹). Er behandelt zwar in seiner allgemeinen, der Geophysical Union vorgelegten Arbeit nur die unvollkommen ausgebildeten Formen der ihm vertrauten kalifornischen Sierra Nevada und des Mt. Rainier (Honeycombs, Suncups), die aber Vorstadien der eigentlichen Penitentes sind. Sie sind nach ihm „streng genommen Verdunstungswannen“, die sich in großen Höhen niedriger Breiten bei Trockenheit der Luft durch langdauernde starke Insolation bilden. Sie entstehen in reinem Schnee und haben mit Staubschalen und bedeckter Ablation nichts zu tun. Bei ihrer Bildung entsteht kein Schmelzwasser, sie sind vielmehr stets trocken, so trocken, daß in den höheren Teilen der Sierra Nevada über 3650 m die Schneefelder zum Verschwinden kommen, ohne eine Spur von Schmelzwasser an die Bäche abzugeben. Für die Ernährung der weiter unten in der Waldstufe entstehenden Flußsysteme sind sie vollständig bedeutungslos. Auch die Gletscher des Mt. Rainier, die ganz in der trockenen Höhenstufe liegen, tragen durch oberflächliches Schmelzen gar nichts zum Abfluß des Gebirges bei, ja selbst das Schmelzwasser, das sich an ihrem Grund durch den Druck des Eises und die Bodenwärme bildet, ist sehr gering.

F. E. Matthes macht in der gleichen Arbeit den Vorschlag, den international eingebürgerten Namen Penitentes zu ersetzen, und zwar durch englische Wörter, die auch adjektivische Formen bil-

den lassen. Die Initialformen flacher, nur wenige Zoll tiefer Schalen, die auch in tieferen Lagen und höheren Breiten auf der Schneefläche vorkommen, nennt er „suncups“, die mehrere Fuß tiefen, in Reihen und polygonalen Mustern angeordneten Gruben, die schon an die besonderen Bedingungen der Schneeverdunstung hoher Trockengebirge geknüpft sind, „sunpits“ und spricht von „suncupped“ bzw. „sunpitted snowfields“. Von „Suncupped Ice“ hatte schon 1912 *J. H. William* am Beispiel des Mt. Hood gesprochen²²). Für das dritte Stadium, das den Übergang von den Hohlformen zu den Vollformen bzw. Restformen darstellt, die eigentlichen Penitentes — ein „für Menschen englischer Zunge häßlich auszusprechendes Wort“ — erbittet er Vorschläge. *Ch. K. Wentworth*²³) erfüllt diesen Wunsch und spricht statt von Penitentesfiguren nur von „Spikes“. Wäre es aber nicht schade, wenn ein in Jahrzehnten eingebürgerter, aus dem Volksmund entlehnter Name mit lateinischer, also weithin verständlicher Wurzel dem Rationalismus einer Zeit geopfert würde, die für den tiefen kulturgeschichtlichen Gehalt, der dem Wort zugrunde liegt, kein Verständnis mehr aufbringt? Es ist übrigens ein weit verbreiteter, auch bei *Matthes* ausgesprochener Irrtum, daß sich der Vergleich mit Büßern auf büßende Frauen (Nonnen) beziehe. Das echte Büßergewand ist noch heute im Volksleben Tiroler und Schweizer Alpentäler auch für Männer das weiße Gewand. Freund *Kinzl* verdanke ich den Hinweis, daß im Walliser Lötschental noch heute die „Bruderschaft der Büßer“ regelmäßig in weißen Gewändern mit der Prozession geht, was auch bildlich in der Literatur festgehalten ist²⁴).

Was die Ausführungen von *F. E. Matthes* über die Neigung der Penitentes im Verhältnis zur geographischen Breite und zum Einfallswinkel der Sonnenstrahlen anlangt, so werden diese unserer heutigen Kenntnis aus allen Teilen der Welt nicht mehr gerecht und sind namentlich durch die früher (a. a. O. 1942a) referierte Arbeit von *Rossmann* überholt. *W. Meinardus*²⁵) hat in der Besprechung meiner Monographie noch die Ansicht ausgesprochen, daß für die Reihenentwicklung der Penitentes außer der Kulminationshöhe der Sonne auch die Tatsache von Bedeutung sei, daß in niederen Breiten der Azimut der Sonne am frühen Vormittag und späten Nachmittag viele Stunden der West-Ostrichtung sehr nahe liegt, am Äquator beinahe von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang damit zusammenfällt. In den höheren Breiten, wo der Büßerschnee aber nicht mehr heimisch ist, ist die Zeitdauer der Bestrahlung aus den einzelnen Himmelsrichtungen gleichmäßiger, an den Polen sogar ganz gleichmäßig verteilt.

5. Fortschritte der regionalen Penitentesforschung, besonders im Hinblick auf die Ablationsfrage

Nach der Regelmäßigkeit im jahreszeitlichen und räumlichen Auftreten von Büßerschnee haben wir periodische und episodische Schneepenitentes unterschieden. Die periodischen treten alljährlich oder doch regelmäßig zu bestimmten Zeiten des Jahres nach Perioden des Schneefalles auf, in den Subtropen bei der Aufzehrung der Winterschneedecke, in den äquatorialen Hochgebirgen nach der Bildung einer regenzeitlichen Schneedecke in kürzerer Zeit, in den Hochgebirgen des Monsunklimas eventuell in den Spätsommer- oder Herbstmonaten nach dem monsunzeitlichen Schneefall. Episodische Penitentes treten selten und isoliert auf, entweder in Gebieten, in denen keine Dauerschneedecke gebildet wird, an Stellen lokaler Schneeanhäufung, z. B. aus Schneewächten (punkthafter Büßerschnee) oder in Gebieten, in denen normalerweise die Klimabedingungen für Penitentesbildung unzureichend sind, bei besonders günstigen strahlungs- und verdunstungsreichen Wetterlagen (wetterhafter Büßerschnee).

a) Argentinisch-chilenische Kordilleren

Für das klassische Gebirge des Nieve de los Penitentes, für das ich die Verbreitung des Penitentesphänomens dargestellt habe, sind nur einige literarische Quellen nachzutragen, die keine wesentlich neuen Gesichtspunkte enthalten²⁶⁾. *Barrera*, der sich als Chilene eingehenderen Beobachtungen hingegeben hat, macht darauf aufmerksam, daß die Erscheinung auf der chilenischen Seite der Cordilleren ebenso entwickelt sei wie auf der argentinischen. Er erwähnt ein südlichstes Vorkommen auf der argentinischen Seite, an dem 4115 m hohen Vulkan Tromen zwischen dem Rio Colorado und Rio Neuquén nordöstlich Chos Malal, also in 37° 08' s. Br., während das südlichste chilenische Vorkommen nach wie vor der Krater des Descabezado Grande in der Breite von Talca darstellt. Er bestätigt durch Beobachtungen auf dem Cerro Negro in der Cordillera Morada die Auffassung *Helblings*, daß über der Schneegrenze auf den Gletschern mächtige, ausdauernde, weil nach der winterlichen Schneeverhüllung weiter entwickelte Penitentes vorkommen. Die Rolle der Verdunstung wird auch von ihm unterstrichen, für deren Zustandekommen er Sonnenstrahlung und Wind verantwortlich macht.

b) Die tropischen Anden

Die Beobachtung *Kühms* über Penitentes am Vulkan Sajama in Westbolivien wird in einem Reisewerk von *S. Neumann*²⁷⁾ bestätigt. Er fand sie von 5600 m an aufwärts in schöner

Ausbildung von 50—60 cm Höhe, also in der Zone des Jahreszeitenschnees. Sie sind durch zwei gute Abbildungen belegt.

Aus den Schneegebirgen Kolumbiens und Venezuelas war bisher Büßerschnee noch nicht bekannt. Nunmehr hat die amerikanische Cabot-Expedition von den höchsten Höhen der Sierra Nevada de Santa Marta aus 5340 m ein Bild geliefert, das ein Schneefeld, offenbar über der Schneegrenze, wiedergibt, das in viele Zacken aufgelöst erscheint und als „Nieve penitente“ erläutert ist²⁸⁾. Leider fehlen Angaben über Ausbildung und Jahreszeit. Die Kordillere hat zwei Regenzeiten und zwei Trockenzeiten, die längere (Verano) von Dezember bis März, die kürzere (Veranillo de San Juan) im Juni und Juli. Das Vorkommen entspricht nach Höhenlage, klimatischen Voraussetzungen und Lage in der Firnregion den von *H. Meyer* aus Ecuador beschriebenen Penitentes. In dem von mir entworfenen Längsprofil der amerikanischen Kordilleren ist für die untere Grenze der Penitentes eine kleine Korrektur anzubringen, da diese von Ecuador nach Kolumbien nicht weiter ansteigt, sondern wie die einige hundert Meter tiefer liegende Schneegrenze horizontal verläuft. Dabei wäre allerdings angenommen, daß auf den unmittelbar unter dem Regenzeitenäquator gelegenen Vulkanen der columbischen Zentralkordillere (Tolima, Huila) noch Büßerschnee gefunden wird.

c) Mexiko und Nordamerika

Für den Popocatepetl in Mexiko ist mir eine neue ausgezeichnete Beobachtung von Penitentes bekannt geworden, die Herr *W. Kraft-Nürnberg* am 13. 4. 1930 gemacht und in einer guten Photographie festgehalten hat (s. Abb. 1). Ich verdanke sie der Vermittlung von Professor *R. Lütgens-Hamburg*. Sie stammt von 5100 m Höhe, also 350 m unter dem Kraterand. Es sind 130 cm hohe, in spitze Pyramiden aufgelöste Schneefiguren, die bereits isoliert dem nackten Boden aufsitzen — also typische Bildungen des Jahreszeitenschnees. Auch *F. Marmillod* berichtet²⁹⁾, daß er an Ostern 1941 auf dem Popocatepetl nach langer Trockenzeit den Firn in ganze Felder von Penitentes von schöner Form und beträchtlicher Höhe aufgelöst angetroffen habe. Und am Citlalpetl (= Pic von Orizaba, 5762 m) beobachtete *C. Long*³⁰⁾ am 3. April 1926 gegen 5400 m die Bildung von Büßerschnee, der nach der Photographie sehr steilstehend und rauh entwickelt war. Es scheint also auf den Schneevulkanen Mexikos die Penitentesbildung doch eine regelmäßige, jedenfalls häufige Erscheinung zu sein, und zwar nach allen bisherigen Beobachtungen in den Frühjahrsmonaten Februar bis

April. In der Regenzeit Juni bis September bedecken sich die Berge mit Schnee und sind im Oktober am stärksten verschneit. Von dann an geht der Schnee langsam zurück bis an den Anfang der nächsten Regenzeit. Seine Oberfläche wird dabei immer härter, so daß im Frühjahr die Schneehänge von der täglichen Erosion tief zerfurcht werden (nach *Marmillod*). Wir können heute schon sagen, daß die mexikanischen Vulkane in ihren Schneeverhältnissen (Sommer Schnee, der im Winter erhärtet und im Frühjahr häufig in Penitentes verwandelt wird) vollständig der nordchilenisch-bolivisch-südperuanischen Westkordillere (Sajama, Aucanquilcha, Misti) gleichen, nicht aber den übrigen bolivisch-peruanischen Kordillieren.

Klima der Hochregionen des Mt. Rainier weit über der regen-, wolken- und nebelreichen Waldstufe zurück, in die der Winterschnee im Frühsommer noch bis 1200 m hinabreicht.

d) *Hawaiische Inseln*

Eine Arbeit von geologischer Seite macht erstmals mit Penitentesbildung auf den Vulkanen der Hawaiischen Inseln bekannt, und zwar vom Gipfel des Mauna Kea, der mit 4204 m den höchsten Berg der Inselgruppe darstellt. Die Beobachtungen wurden von *Wentworth* im Rahmen der glazialgeologischen Untersuchung am 24. Juli 1939 angestellt³²⁾. Die ersten Schneefelder begannen schon in einer Höhe von 3650—3750 m, aber erst in 3975 m waren sie in Suncups, Sunpits



Abb. 1. *Büßerschnee am Popocatepetl, Mexiko*
Aufn. *W. Kraft*, 13. 4. 1930

Für die Sierra Nevada und den Mount Rainier enthält die jüngere Arbeit von *F. E. Matthes*³¹⁾ genauere Höhenangaben. Am Mt. Rainier treten die tieferen „Sunpits“, die dem Alpinisten große Hindernisse verursachen, erst von 3950 m aufwärts auf, bei 3650 m sind sie seichter und nur etwa 1 Fuß tief, bei 3050 m „degenerieren“ sie zu „Suncups“ von 1/2 Fuß Tiefe und sind dem Bergsteiger eine Hilfe. Um 2750 m Meereshöhe sind sie nur wenige Zoll tief, bei 2450 m sind es nur Wellungen, die eine Abfahrt auf der Schneeoberfläche nicht mehr stören. Für die Sierra Nevada spricht er von „strongly sunpitted snowfields“ über 3650 m Höhe, darunter bis etwa 3350 m nahe der Waldgrenze aber nur von „suncupped snowfields“. Die relativ regelmäßige Ausbildung der Sunpits auf dem Mt. Rainier in der extrem äquatorfernen Lage von 46° 50' n. Br., während z. B. in den Rocky Mountains nichts dergleichen beobachtet wird, führt auch *Matthes* auf das besonders trockene

und Penitentes umgewandelt. Offenbar nur von der Arbeit von *F. E. Matthes* angeregt und von Literatur aus anderen Erdteilen nicht beschwert, gibt *Wentworth* im wesentlichen nur eine Bestätigung von dessen Gesichtspunkten. Nach Abbildung und Schilderung sind die Penitentesfelder sehr schön entwickelt, wohl am schönsten in den ganzen Vereinigten Staaten. Sie erreichten 4 Fuß Höhe, waren in deutlichen Reihen von West nach Ost angeordnet, mit ihrem Grundriß in der gleichen Richtung gestreckt, also blattförmig, wobei ihre Basis 6 bis 24 Zoll in der Längsrichtung, 2 bis 6 Zoll quer dazu maß. Auch schon die Gruben wiesen eine elliptische Streckung in Ost-West-Richtung auf. Merkwürdigerweise war die Stellung der Figuren vollständig senkrecht. Die Auflösung der Schneefelder war, wie immer, vom Inneren der Schneefelder gegen den Rand fortgeschritten, und zwar so, daß etwa 50 Fuß vom Rand entfernt der Boden zwischen den Figuren sichtbar wurde und nur in der äußersten

Zone die einzelnen Figuren völlig isoliert waren. Eine Beziehung zum Relief war nicht festzustellen, meist aber lagen die Penitentesfelder auf 20—30° geneigtem Hang.

Einige Besonderheiten erklären sich aus dem räumlichen und zeitlichen Auftreten. Die Mächtigkeit der Schneeanhäufung und die längere Erhaltung, wie sie für die Entstehung von Penitentes notwendig sind, waren nach *Wentworth* besonders bei dem direkt am Kamm durch vorherrschenden Wind abgelagerten Schnee gegeben, also bei Schneewächten. Dies ist auch aus anderen Gebieten der Erde bekannt, z. B. aus den bolivianischen Kordilleren bei gleicher Breite auf der Südhalbkugel. Außerdem ist zu bedenken — und auch das stimmt mit dem gesamten Beispiel überein —, daß die Penitentes des Mauna Kea sich in sehr kurzer Zeit gebildet hatten. Besucher, die dieselbe Stelle am 8. und 11. Juli 1939, also zwei Wochen vorher gesehen hatten, hatten nichts davon bemerkt. Erst am 20. Juli beobachtete man entstehende Formen. Sie waren also etwa in einer Woche entstanden. Damit aber wird die fehlende Neigung der Penitentes im Gegensatz zu Argentinien verständlich. Denn in dieser kurzen Bildungszeit steht die Sonne über den Hawaiischen Inseln ungefähr im Zenith, was auch theoretisch zu senkrechten und deutlich west-ost-gestreckten Figuren führen muß.

Ähnlich dem Mt. Rainier hat auch die Gipfelregion der Hawaiischen Vulkane hoch über dem regenreichen, passatexponierten Waldgürtel ein sehr trockenes und dabei frostfreies Klima. Die Mittagstemperaturen waren zur Zeit der Beobachtung + 11° C, aber nachts sinkt das Thermometer in dieser Höhe auch im Sommer immer unter den Gefrierpunkt. Bei der Trockenheit der Luft ist anzunehmen, daß die Schneeoberfläche auch bei Tage nicht schmilzt, sondern direkt verdunstet. Wasserabfluß war denn auch nicht zu sehen, und *Wentworth* unterstreicht, daß die wesentliche Aufzehrung des Schnees durch Verdunstung geschieht. Ganz nahe dem Gipfel, bei dem in 3970 m Höhe gelegenen Kratersee Waiau wurden 1935 von der Mauna Kea-Expedition in den Tagen vom 8. bis 19. August meteorologische Beobachtungen gemacht³³). Die mittlere Feuchtigkeit in dieser Zeit betrug 47 %, der See war jeden Morgen gefroren, die Minimumtemperatur war am 18. August — 7,2° C. Die Zone größter Niederschläge liegt nach verschiedenen Stationen auf der Süd- und Ostseite des Berges (in 2000—2600 Meter), jedenfalls unter 2600 m. Für den Gipfel ergibt sich durch Extrapolation der in den tieferen Stufen gemachten ganzjährigen Temperaturbeobachtungen eine mittlere Jahrestemperatur von + 2 · 2° C. Die Wilkes-Expedition hatte Dezember 1840 bis Januar 1841 am be-

nachbarten Mauna Loa in ähnlicher Höhe Temperaturen zwischen + 12 · 8 und — 9° gemessen. Am Ende des Winters ist auf dem Mauna Kea viel Schnee angehäuft. Die Schneefälle reichen in normalen Wintern bis etwa 10000 Fuß herab, aber ein besonders heftiger Sturm hatte im Februar 1926 den Berg bis 7000 Fuß herab in Schnee gehüllt. In einer anderen Arbeit äußert *Wentworth* die Meinung, daß eine Temperaturerniedrigung von 5,5° C auf dem Mauna Kea heute eine Vergletscherung erzeugen würde³⁴).

e) Mediterrangebiet, Teneriffa und Afrika

Schöne periodische Penitentesbildung ist aus dem Mediterrangebiet nicht bekannt, offenbar durch mangelnde Sommertrockenheit in den Höhen verhindert. Eine flüchtige Beobachtung durch *O. Marinelli* am Ätna muß aber in diesem Zusammenhang nachgetragen werden³⁵). Der Krater hatte im März eine Eruption, durch die Aschen und Bomben auf Schneefelder geworfen wurden. Durch den Vorgang der bedeckten Ablation wurde bis April eine sehr unregelmäßige Oberfläche erzeugt, ganze Felder von Löchern bis 1/2 Meter Tiefe und auch Schneetische, die von größeren Bomben gekrönt waren. Daneben gab es in 2500 m Höhe Felder von kleinen, undeutlichen Penitentes, die nach der Aussage der Führer auch ohne Aschenauflagerung entstehen sollen.

Dagegen mehren sich die Beobachtungen von Büßerschnee in der trockenen Hochregion des *Pico de Teyde* auf Teneriffa. Schon anlässlich des Internationalen Geologenkongresses in Madrid im Mai 1926 haben Teilnehmer der Teneriffa-Expedition echten Büßerschnee beobachtet. Der Wiener Mineraloge *E. Dittler* hat in seiner schönen Beschreibung dieser Fahrt³⁶) davon ein gutes Bild veröffentlicht, das ganz steilstehende Schnee-Penitentes zeigt. Sie fanden sich in 3500 m Höhe, 250 m unter dem Gipfel, wo sich Mitte Mai noch Winterschnee gehalten hatte. In der gleichen Jahreszeit, im Mai 1936, hat sie der Schweizer Alpinist *H. Faes* beobachtet und genau beschrieben³⁷). Die Figuren erreichten Manneshöhe und sind ebenfalls so steil, daß eine Neigung aus dem Bild nicht zu erkennen ist. In Verbindung mit der früheren Beobachtung von *O. Pratzje* kann man vielleicht schon annehmen, daß es sich um eine periodische, alljährliche Erscheinung handelt, wenn auch nicht um ganzsommerigen Büßerschnee wie in Argentinien-Chile, sondern um eine Erscheinung des schon im Frühling verschwindenden Winterschnees. Der *Pik* von Teneriffa erinnert insofern an die Hawaiischen Inseln und den Mount Rainier, als auch hier über einem Wolkengürtel in geringer Höhe (bis 1300 m im Bereich der Lorbeerwälder) ein Vulkan in sehr trockene Höhen aufragt. Der

Büßerschnee gibt uns Hinweise auf die Temperatur-, Strahlungs- und Feuchtigkeitsverhältnisse der Gipfelregion wenigstens für die Zeit des Monats Mai.

Von den ostafrikanischen Vulkanen Kilimandscharo und Kenya hat Spink³⁸⁾ in seinem Bericht über den Rückgang der Vergletscherung in jüngster Zeit auch der Penitentes gedacht, ohne gegenüber *H. Klute* Neues bieten zu können. Daß sie am Mt. Kenya so viel weniger, wenn überhaupt ausgebildet sind, will Spink mit der Steilheit der Gletscher erklären, die von den senkrechten Sonnenstrahlen schräg getroffen wurden. Das wäre aber, wie wir heute wissen, kein ausreichender Grund, abgesehen davon, daß am Rande des Lewisgletschers gegen den Lenana Peak auch ebene Schneefelder existieren. Es fehlt aber an dem viel stärker begneten Berg an der nötigen Lufttrockenheit, Wolkenlosigkeit und Strahlung, ebenso wie am Ruwenzori, wenigstens in normalen Jahren.

f) Asien

Ich habe 1943 darzustellen versucht, wie sich im subtropischen Hochgebirgsgürtel Asiens von Iran bis China der Übergang der Schnee- und Gletscherablation vollzieht. Im zentralen Hindukusch bilden sich alljährlich aus der winterlichen Schneedecke im Sommer schöne Penitentesfelder unter ganz ähnlichen Verhältnissen wie in den argentinisch-chilenischen Kordilleren bei gleicher Breite — sicher die großartigste Entwicklung des Penitentesphänomens auf der nördlichen Halbkugel. Im Nordwesthimalaya hatte sich 1906 auf dem Nun-Kun-Massiv in über 5000 m Höhe infolge abnorm trockener Wetterbedingungen ausnahmsweise, also episodischer Büßerschnee gebildet. Im Karakorum kommen zu solchen gelegentlichen Schneepenitentes aus Winterschnee noch die verwickelten Formen der Gletscheroberfläche, bei denen die Ablation eine gewisse Rolle spielt, die „Firnpyramiden“ und „Firnseracs“. Im zentralen und östlichen Himalaya und in den Hochgebirgen Westchinas dagegen kann sich episodischer Büßerschnee umgekehrt aus sommerlichem Monsunschnee in der winterlichen Trockenheit bilden.

Hier sind die Beobachtungen nachzutragen, die der Geologe *N. E. Odell* am Mount Everest gemacht hat³⁹⁾. Es handelt sich dabei um die Nordseite des Himalaya am Übergang vom feuchten Monsunklima zum trockenen tibetischen Klima. *Odell* hebt das Zusammenfallen der tiefen Temperaturen, extremer Trockenheit und steiler Sonnenstellung im Sommer (28° Breite) hervor. Er zitiert Messungen der Strahlungstemperatur von +40° C bei einer Lufttemperatur von -2° C. Daher sei die Ablation auf den Glet-

schern enorm, und zwar durch direkte Verdunstung, nicht durch die leichter sichtbare Schmelzung. Am Mt. Everest könne im Frühjahr oder Sommer ein beträchtlicher Schneefall in wenigen Stunden aufgezehrt sein ohne sichtbare Schmelzwirkung. Auf dem östlichen Rongbuk-Gletscher bringt die Ablation gigantische, spitz zulaufende Eispfeiler hervor, neben Kryokonitlöchern von großer Tiefe, Gletschertischen und „Dust Walls“. Diese Pfeiler, die eine steilere Flanke auf der Südseite haben, wandern mit dem Gletscher abwärts, sind also ausdauernde Bildungen aus Gletschereis. Sie sind daher keine echten Penitentes, sondern entstehen primär durch Zerspaltungen des Gletschers und werden erst sekundär durch die Verdunstungsablation überformt. Aus der Darstellung des Autors und der an seinen Vortrag anschließenden Diskussion hat man den bestimmten Eindruck, daß es sich um die aus dem Karakorum beschriebenen Erscheinungen handelt, vielleicht sogar um eine Gliederung des Gletschers in einen Liegend- und Hangendgletscher (vgl. Arbeiten von *Visser*, *Desio* u. a.). Auf Grund verfeinerter Beobachtungen auf der Everest-Expedition 1938 unterscheidet *Odell* in einer neueren Arbeit⁴⁰⁾ diese großen Firnpyramiden („Giant Pinnacles“), deren Bildung durch reine Verdunstungsablation in der Firnregion als (perennierende) Penitentes beginnt und die bei der Wanderung auf dem Rücken des Gletschers talwärts schließlich bis 60 m Höhe erreichen können, und gewöhnliche Penitentes von 2½ Fuß Höhe, die sich aus jahreszeitlichen Schneefeldern in 5000 bis 5500 m bilden und z. B. auf dem Pang La und im Kharta-Tal auf alpinen Wiesen beobachtet wurden.

g) Gemäßigte Breiten

Aus den gemäßigten Breiten, in denen Penitentes nicht periodisch mit Ausnahme der Hochgipfel des Cascadegebirges-, sondern nur noch episodisch bei besonderen Wetterlagen gebildet werden, sind zwei besonders schöne Fälle bekannt geworden, die registriert zu werden verdienen, weil noch einige Teilfragen dadurch weiter geklärt werden können. Bei Boston beobachtete *R. L. Nichols*⁴¹⁾ im März 1939 schöne, bis 1 Fuß hohe Penitentes, deren glatte Schattenseite mit etwa 54° gegen den horizontalen Boden geneigt waren. Sie stimmen nach Form und zeitlichem Auftreten ungefähr mit den Penitentes überein, die *F. Klute* schon 1915 vom Schwarzwald aus der Zeit der Frühjahrsäquinoktien beschrieb. Vom 11. bis 13. März hatte sich eine etwa 35 cm dicke Schneedecke gebildet. Es folgten eine Reihe von Tagen mit Frost, geringer Luftfeuchtigkeit und an mehreren Tagen Sonnenschein. Am 21., 22. und 23. März waren die

Penitentes gebildet, am 24. März wurden sie durch einsetzendes Tauwetter geschmolzen. Aus der Zahl und Größe der Penitentes zog *Nichols* den Schluß, daß die Verdunstung in diesen Tagen etwa $\frac{1}{4}$ der gefallenen Schneemenge aufgezehrt und damit dem Abfluß entzogen hat.

In den nordtiroler Alpen hat eine ungewöhnlich lange Hochdruckperiode vom 8. bis 28. März des Jahres 1943 ganz ähnliche Penitentes von ähnlicher Höhe und Neigung erzeugt. *H. Gams* hat sie am Patscherkofel bei Innsbruck in 2100 bis 2200 m Höhe photographisch festgehalten (s. Abb. 2) und freundlich zur Verfügung gestellt.

6. Zusammenfassung

Die Ablation von Schnee und Gletschern ist ein Vorgang, der dem Wasserkreislauf der Erde angehört und der den Wasserhaushalt der Hochgebirge stark beeinflusst. Im Landschaftsbild wirkt sie sich unmittelbar durch die sog. Ablationsformen von Eis und Schnee aus (Gletscherische, Ablationskegel, Kryokonitlöcher, Penitentes usw.). Verursacht wird sie zum Teil durch die Sonneneinstrahlung (direkte Sonnen- und diffuse Himmelsstrahlung), zum Teil durch die Atmosphäre (Luftwärme, Kondensationswärme). Die Strahlungsablation wirkt sich zum Teil in-



Abb. 2. Penitentes auf dem Patscherkofel bei Innsbruck
Aufn. H. Gams, März 1943

In den Breiten von 45° — 50° ist offenbar der März weitaus bevorzugt. In dieser Zeit kommen noch längere Frostperioden und stärkere Neuschneedecken auch im Tiefland vor, und die Sonnenstrahlung ist gegenüber den Wintermonaten bereits beträchtlich verstärkt. In höheren Breiten und im Hochgebirge verschieben sich die Aussichten in den Spätfrühling bis Frühsommer, in niedrigeren Breiten umgekehrt mehr in den Spätwinter. Von den bisher beschriebenen neun Fällen fallen denn auch sechs in den Monat März und liegen in der genannten Breite (*Klute*, Schwarzwald, März 1915; *Roßmann*, Schwarzwald, März 1929; *Eberle*, Westpreußen, März 1932; *Capello*, Südalpen, März 1936; *Nichols*, Boston, März 1939; *Gams*, Tirol, März 1943); ein Fall (*Kassner*, Sofia, Februar 1914) entspricht der niedrigeren Breite, ein weiterer Fall (*Newmann*, Gotthard, Juni 1908) der größeren Meereshöhe.

direkt durch auflagernde Fremdkörper („bedeckte Ablation“), zum Teil direkt auf reine Schnee- und Eisflächen aus („freie Ablation“). Bei der bedeckten Ablation fangen die auflagernden Fremdkörper die Strahlung auf und geben sie, bei feiner Verteilung übermäßig erwärmt, als schmelzende Wärme an Eis und Schnee weiter, Hohlformen erzeugend, oder aber sie schützen durch ihre Masse die Unterlage vor der Ablation und erzeugen Vollformen. Im Gegensatz dazu wirkt die freie Strahlungsablation nicht schmelzend, sondern erzeugt direkte Verdunstung, wozu außer sehr starker Strahlung auch besondere atmosphärische Verhältnisse (niedere Lufttemperatur, hohe Trockenheit, große Psychrometerdifferenz) notwendig sind.

Genaue Bestimmungen des Anteils, den die Strahlung und Atmosphäre an der Gesamtablation haben, liegen bisher nur aus polaren und subpolaren Breiten vor. Für niedrigere Breiten

haben wir nur indirekte Anhalte aus den Formen der Ablation. Der beträchtliche Anteil der Strahlung auch in den hohen Breiten Spitzbergens und Grönlands, zunehmend mit der Meereshöhe, erklärt die starke Rolle, die in hohen Breiten die selektive schmelzende Strahlungsablation spielt (Kryokonitlöcher, Schmelzkegel). Dagegen ist der Anteil der direkten Verdunstung in hohen Breiten minimal, so daß die Formen der freien, verdunstenden Ablation vollständig fehlen. In den gemäßigten Breiten der Nordhalbkugel treten sie bei gelegentlichen trockenen, strahlungsreichen Wetterlagen auf (wetterhafte Penitentes), regelmäßig bilden sie sich aber erst in den großen Höhen subtropischer und tropischer Hochgebirge mit ihrer durch Breite und Meereshöhe bedingten sehr starken Strahlung, soweit dort die besonderen Gunstbedingungen der Trockenheit und Wolkenlosigkeit in bestimmten Jahreszeiten nach Schneebildung gegeben sind.

Nur dort entstehen die schönen, periodischen Penitentes mit ihren Vorläufern in „Suncups“ und „Sunpits“, wie schon früher bei der geographisch-monographischen Behandlung der Penitentes gezeigt und durch weitere Beobachtungen am Mauna Kea (Hawaii), auf den Vulkanen Mexikos, am Pico de Teyde (Teneriffa), in der Sierra Nevada und am Mount Rainier bestätigt wurde. Sie sind Formen rein verdunstender Strahlungsablation.

Somit erlaubt die geographische Verbreitung und das jahreszeitlich verschiedene Auftreten von Penitentes auch wieder Rückschlüsse auf die besonderen atmosphärischen Bedingungen und das Klima einzelner Hochgebirge. Für den Naturhaushalt dieser Gebirge und für die Kulturländer an ihrem Fuße sind diese Bedingungen deshalb von großer Wichtigkeit, weil die verdunstende freie Ablation kein Schmelzwasser liefert und daher keinen nutzbaren Wasserabfluß erzeugt.

ANMERKUNGEN

¹⁾ *Troll, C.*, Büsserschnee (Nieve de los Penitentes) in den Hochgebirgen der Erde. Ein Beitrag zur Geographie der Schneedecke und ihrer Ablationsformen. Peterm. Geogr. Mitt. Erg. H. 240. Gotha 1942 (a).

²⁾ *Troll, C.*, Neue Gletscherforschungen in den Subtropen der Alten und Neuen Welt (Karakorum und argentinische Anden). Ztschr. Ges. f. Erdk. Berlin 1942. S. 54—65 (b).

³⁾ *v. Klebelsberg, R.*, Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie. I. Allgem. Teil. Wien 1948. S. 101

⁴⁾ Vergl. Darstellung bei *v. Klebelsberg*, a. a. O. 1948, S. 109 ff.

⁵⁾ *Pascal, Ingeborg*, Der Kryokonit. Ein Beitrag zur Morphologie der Gletscheroberfläche. Diss. Innsbruck 1945. (Manuskript).

⁶⁾ *Philipp, H.*, Über die Beziehungen der Kryokonitlöcher zu den Schmelzschalen und ihren Einfluß auf die Ablationsverhältnisse arktischer Gletscher. Ztschr. Dt. Geol. Gesellsch., Bd. 64, 1912.

⁷⁾ *Steinhöck, O.*, Über Kryokonitlöcher und ihre biologische Bedeutung. Ztschr. f. Gletscherkde., Bd. 24, 1936.

⁸⁾ *Wagner, A.*, Zur Entstehung von Kryokonitlöchern. Ztschr. f. Gletscherkde., Bd. 26, 1938.

⁹⁾ *Dufour, Ch.* und *Forel, F. A.*, Recherches sur la condensation de la vapeur aqueuse de l'air au contact de la glace et sur l'évaporation. Bull. Soc. Vaudoise Sci. Natur. vol. X. 1870.

¹⁰⁾ *Billwiller, R.*, Der Wasseraustausch zwischen der Luft einerseits und Schnee und Eis andererseits im Gebirge. Ann. Schweiz. Meteor. Zentralanst. Jg. 1918. Zürich 1920.

¹¹⁾ *Monterin, U.*, Ricerche sul contributo delle condensazioni occulte nei deflussi dei torrenti alpini. Boll. Comit. Glaciol. Ital. Nr. 19. Torino 1939.

¹²⁾ *Ablmann, H. W.*, On the formation of Hoarfrost and its relation to glacial growth. Journ. of Geol., Chicago, 37, 1929.

¹³⁾ *Heim, Arn.*, und *Gansser, A.*, Central Himalaya. Geological Observations of the Swiss Expedition 1936. Denkschrift Schweiz. Naturf. Ges. 73. 1939.

¹⁴⁾ Scientific Results of the Norwegian-Swedish Spitzbergen Expedition in 1934, pt. IV. *Sverdrup, H. H.*, The Ablation on Isachsen plateau and on the Fourteenth of July Glacier in Relation to Radiation and Meteorological

Conditions, pt. V. *Ablmann, H. W.*, The Fourteenth of July Glacier. Geografiska Annaler 17, 1935.

¹⁵⁾ *Ablmann, H. W.* and *Thorarinsson, Sig.*, Vatnajökull. Pt. V. The Ablation. Geograf. Annaler, 20. 1938.

¹⁶⁾ *Slanar, H.*, Klimabeobachtungen aus Zentralisland (Nordwestrand des Vatna-Jökull). Met. Ztschr. 50. 1933.

Evers, W., Über Riesenformen von „Gletscherkegeln“ auf dem Austerdalsbrä. Norsk Geograf. Tidsskr. 1935.

¹⁷⁾ *Monterin, U.*, Ricerche sull'ablazione e sul deflusso glaciale nel versante meridionale del Monte Rosa. Boll. Comit. Glaciol. Ital. Nr. 11. Torino 1931.

¹⁸⁾ *Maurer, H.*, Über Gletscherschwund und Sonnenstrahlung. Meteor. Ztschr. 31. 1914.

¹⁹⁾ Studies in North-East Greenland 1939—40. Pt. IV. *Backa E. Eriksson*, Meteorological Records and the Ablation on the Fröya Glacier in Relation to Radiation and Meteorological Conditions. Geogr. Annaler, 24. 1942. S. 39.

²⁰⁾ *Knoche, W.*, Über den Einfluß der Verdunstung auf die Vergletscherung. Zeitschr. f. Gletscherkde., 19. 1931.

²¹⁾ *Matthes, F. E.*, Ablation of Snow-fields at High Altitudes by Radiant Solar Heat. Amer. Geophys. Union, Transactions, XVth Annual Meeting, pt. II. 1934.

²²⁾ *William, J. H.*, The Guardians of the Columbia. Tacoma 1912.

²³⁾ *Wentworth, Ch. K.*, Ablation of Snow under the vertical Sun in Hawaii. Am. Journ. of Science, vol. 238, No 2. New Haven, Conn., 1940. S. 112—116.

²⁴⁾ *Siegen, Prior J.*, Volksleben im Wallis. In: Schweizer Volksleben, hrsg. von *H. Brockmann-Jerosch*. Erlenbach-Zürich. 1929 u. 1931, Bd. II, bes. Bild 105.

²⁵⁾ *Meinardus, W.*, Büsserschnee in den Hochgebirgen der Erde. Peterm. Geogr. Mitteil. 1943. S. 44/45.

²⁶⁾ *Kühn, A.*, Die Besteigung des Vulkans Overo. 17. Jahresbericht Niedersächs. Geol. Vereins, Hannover 1925. *Maass, A.*, Büsserschnee. Atlantis, Jg. 5, 1933. S. 657 bis 659.

Jacob, Chr., Del Aconcagua al Tupungats. Visiones andinas en la region de los „Penitentes“. Anal. Soc. Cient. Argent., t. 130, Entr. 3, Buenos Aires 1940.

Daszynski, S. W., A Polish Expedition to High Andes. Geogr. Journ., 84, 1934. S. 215—223.

Barrera, H. V., A Study of the „Nieve penitente“ of the Chilean Andes. Assoc. Intern. d'Hydrologie Scientifique, Bull. No. 23. Sixième Assemblée Génér. à Edingbourg 1936. II. Part. de Travaux de l'Assoc. — Compt. Rend. et Mém. des Commiss. des Neiges et des Glaciers. Riga 1938. S. 587 bis 622.

²⁷⁾ *Neumann, Sigfrid*, Quer durch Vom Hochland Boliviens zum Amazonas. München o. J.

²⁸⁾ *Cabot, Thom. D.*, The Cabot Expedition to the Sierra Nevada de Santa Marta of Columbia. Geogr. Review, vol. 29, 1939. S. 587 ff. und Fig. 23.

²⁹⁾ *Marmillod, F.*, Notes sur l'alpinisme au Mexique. Die Alpen, Bd. 18, Bern 1942. S. 211—215.

³⁰⁾ *Long, Const.*, Le développement de l'alpinisme au Mexique. Die Alpen, Bd. III, 1927. S. 227.

³¹⁾ *Matthes, F. E.*, a. a. O. 1934.

³²⁾ *Wentworth, Ch. K.*, a. a. O. 1940.

³³⁾ Meteorological Reports of the Mouna Kea Expedition 1935. Bull. Americ. Meteorolog. Society, Pt. I by *J. W. Coulter*, vol. 19, 1938, S. 349—51; Pt. II: The Meteorological Observations at Lake Waiau, Aug. 8—19, 1935, by *Cl. T. Raine*, vol. 20, 1939, S. 97—105; Pt. III: Climate of the Humuula Plateau, by *J. W. Coulter*, vol. 20, 1939, S. 417—19.

³⁴⁾ *Gregory, H. E.* and *Wentworth, Ch. K.*, General Features and Glacial Geology of Mouna Kea, Hawaii. Bull. Geol. Soc. America, 48, 1937, S. 1719—1742.

³⁵⁾ *Marinelli, O.*, Forme di fusione nelle nevi dell'Etna osservate durante e dopo l'eruzione del marzo 1910. Ztschr. f. Gletscherkde. V. 1910/11, S. 224—228.

³⁶⁾ *Dittler, E.*, Eine Geologenfahrt auf den Pic von Teneriffa. Vorträge d. Vereins z. Verbreitung naturwiss. Kenntnisse in Wien. 68 Jg. Wien 1928.

³⁷⁾ *Faès, H.*, Les pénitentes de neige sur le Pic de Téné-rife. Die Alpen, 1936, S. 434—436.

³⁸⁾ *Spink, P. C.*, Further Notes on the Kibo Inner Crater and Glaciers of Kilimanjaro and Mount Kenya. The Geogr. Journ., 106, 1945. S. 210—216.

³⁹⁾ *Odell, N. E.*, Observations on the rocks and glaciers of Mount Everest. The Geogr. Journ., vol. 66, 1925. S. 289 bis 315

⁴⁰⁾ *Odell, N. E.*, Geological and some other Observations in the Mount Everest Region. Appendix D of: *Tilman, H. W.*, Mount Everest 1938. Cambridge 1947. S. 147—151 u. Abb. 13 b und 33.

⁴¹⁾ *Nichols, Rob. L.*, Nieves penitentes near Boston, Massachusetts. Science, vol. 89, No. 2320. 1939.

BRANDUNGSHÖHLEN UND BRANDUNGSKEHLEN

W. Panzer

Mit 5 Abbildungen

Wo immer Meereswellen an das Felsgerüst eines aufsteigenden Festlandes anprallen, entsteht ein Kliff, das heißt ein Steilhang, dessen Form und Ausmaß abhängig sind von der Höhe und dem Böschungswinkel des Landes, der Stärke und Richtung der Brandung, der Standfestigkeit des Gesteins und der Zeit, die zur Einwirkung der Wellen auf das Gestein verfügbar war.

Vor dem Kliff ist in der Regel eine felsige Plattform gelegen, auf der die Brandungswogen gegen das Kliff anlaufen. Sie ist ihr Werk und wird als Brandungsplattform oder Schorre bezeichnet. Die Lage zwischen Niedrigwasser- und Hochwasserlinie beweist allein schon ihre Entstehung aus der Arbeit der Brandungswellen, wenn nicht diese selbst bei ruhiger See in ihrem Spiel, bei starker Dünung oder Sturm im Unmaß ihrer Wucht, mit der sie gegen das Gestade donnern, deutlich Zeugnis davon ablegten, daß sie es sind, die hier den Fels zertrümmern und sich in den Landabfall hineinfressen. Die Brandungswelle überschlägt sich meist schon draußen vor der Schorre und schwappt auf ihrer Rampe reißend und mit ungeheurem Schwall ans Kliff heran und brandet an ihm hoch. Was sich an losgebrochenem Schutt am Fuß des Kliffs gesammelt, wird von jeder dieser Brandungswogen mitgerissen, gegen das Kliff geschleudert und zurückgezerrt. So wird die Brandungsplattform abgeseuert und geschliff-

fen, stellenweise auch ausgestrudelt, das Kliff jedoch mit schweren Schlägen behämert.

Die Ausbildung von Strudellöchern in der Brandungsplattform, d. h. also die Schaffung von Höhlungen im Gestein, die ihre Entstehung der Brandung verdanken, ist anscheinend an bestimmte Gesteine gebunden. *Carlé* beschreibt die schönen Strudelkessel im Granit der Bucht von Vigo¹⁾. Sie sind in gleicher Art bei La Coruña zu beobachten, wo sie beim alten Leuchtturm Torre de Hercules, ebenfalls teilweise mit großen Mahlsteinen und bis zu 50 m Höhe überm Meeresspiegel, von einer früheren Brandungszeit des Meeres in dieser Höhe an der Granitküste Zeugnis ablegen. Auch im Granit der südchinesischen Küste sind sie, in geringerer Höhe, z. B. auf der Insel Cheung Chow unweit Hongkong, bis mannstief und mit glatten Wänden und Mahlsteinen am Grund beredete Zeugen für eine junge Strandverschiebung. An der Südküste der Iberischen Halbinsel, unweit Cadiz, ist die Brandungsplattform in harten geröllreichen Sandsteinen und Konglomeraten von Brandungstöpfen „siebartig durchlöchert“²⁾, und auf der Ostseite der jonischen

¹⁾ *H. Carlé*, Strudelkessel im Granit am Ufer der Bucht von Vigo (NW-Spanien). Geol. d. Meere u. Binnengewässer. 4, 1940. S. 247—249.

²⁾ *O. Jessen*, Die Straße von Gibraltar. Berlin 1927. S. 52. — *Ders.*, Südwest-Andalusien. Erg. H. 186 zu Peterm. Mitt. Gotha 1924. S. 54 und Abb. 9 (Insel Santipetri).