

SCHNEEHYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AM PICO DE TEIDE (TENERIFFA)

Mit 11 Abbildungen und 1 Tabelle

MICHAEL BECHT

Summary: Snow hydrology at Pico de Teide (Tenerife)

The snow ablation under conditions of sub-tropical high mountains was investigated at the Pico de Teide (28°16'N, 16°38'W) during February and March 1990. The results are: (1) The snow density was extremely high at the beginning of the field observations and rose to the highest values over 700 kg/cbm during the ablation period. (2) The correlation of the snow density with the altitude above sea level is negative because the part of refreezing meltwater in the snow cover decreases with increasing altitude. (3) Snow-melt run-off, which occurs only in the lower parts, reaches 10–20% of the total ablation loss. Under the conditions of the intensive radiation in sub-tropical high mountains of Tenerife the ablation of the snow cover was dominated by high rates of evaporation and lower rates of sublimation. (4) Sometimes eolian sediments are transported with strong winds (>100 km/h) and deposited on the snow cover. With the decrease of the albedo the ablation rate increases and reaches the highest values. (5) The movement of free water through the snow cover into the ground was obstructed by ice layers in the lower part of the snow cover and at the surface of the soil. (6) Due to a high rate of both evaporation and sublimation penitentes are built up episodically in regions over 2800 m a.s.l. during periods with cold air temperature.

1 Einleitung

Aus den Gebirgen der gemäßigten Breiten liegen umfangreiche Untersuchungen zur Schneedeckenentwicklung vor. Die Kenntnis der Akkumulations- und der Ablationsraten sind Voraussetzung für wasserwirtschaftliche Planungen (Hochwasservorhersage, Zuflußberechnungen), Abschätzung von Risiken (Lawinen) sowie Infrastrukturplanungen in den Hochgebirgen (Tourismus).

Im Winterhalbjahr liegt auch in den Hochgebirgen der Subtropen oft mehrere Monate hindurch eine geschlossene Schneedecke. Dennoch gibt es nur wenige Untersuchungen zur Schneedeckenentwicklung in dieser Klimaregion, obwohl die temporäre Speicherung einer Wasserrücklage in der Schneedecke für die Landwirtschaft regional von großer Bedeutung ist. So kann die Anbau- und Bewässerungsperiode in den Flußoasen entlang des nordafrikanischen Atlasgebirges durch die Nutzung der Schneeschmelzabflüsse bis

weit in die Trockenzeit hinein ausgedehnt werden (JUNGFER 1990).

In der Sierra Nevada Kaliforniens fällt der winterliche Schnee aufgrund der nördlicheren Lage des Gebirges in der montanen Stufe, so daß hier schon früh Versuche unternommen wurden, die Schneeakkumulation und -ablation durch forstliche Maßnahmen zu beeinflussen (ANDERSON 1956, 1968), mit dem Ziel, den Wasserertrag für das Kalifornische Längstal zu erhöhen. Qualitative Änderungen der Schneedeckenbeschaffenheit waren ebensowenig Gegenstand der Untersuchungen, wie die Frage nach dem Anteil der Verdunstung und Sublimation an der Ablation, der auch in neueren Untersuchungen (BEATY 1975) nicht quantifiziert wird. Auch qualitative Angaben über die Schneedeckenbeschaffenheit sind sehr lückenhaft, so daß die Schlußfolgerungen nicht wesentlich über den Charakter von Vermutungen hinausgehen.

Das Klima auf den Kanarischen Inseln wird durch den NE-Passat ganzjährig geprägt. Die Lage der Passatinversion schwankt zwischen 900 m und 1700 m ü. M. (KÄMMER 1974). Sie liegt im Sommer meist zwischen 1000 m und 1500 m ü. M. und steigt im Winter auf über 1500 m an. Die Konstanz des NE-Passates ist im Sommer (90–95%) höher als im Winter (ca. 50%), wenn maritime Polarlufteinbrüche die Witterung auf den Kanarischen Inseln beeinflussen. Die Wolkenmächtigkeit nimmt dann zu, und es kommt zu zyklonalen Niederschlägen, die bis in die Gipfelregionen hinaufreichen können und dort als Schnee niedergehen. In der übrigen Zeit des Jahres herrscht hier große Trockenheit, die durch eine niedrige relative Luftfeuchte und intensive Einstrahlung verstärkt wird (KÄMMER 1974). Oberhalb ca. 2000 m ü. M. wächst daher keine Waldvegetation. Das große Feuchteangebot in der Kondensationszone unterhalb der Passatinversion führt hier zur Ausbildung eines dichten Nebelwaldes.

Der Pico de Teide (3717 m ü. M.) ist der höchste Berg auf den Kanarischen Inseln. Er liegt auf 28°16'N und 16°38'W. Der Gipfel des Vulkans erhebt sich aus einer Caldera, die eine Hochebene in 2000–2200 m ü. M. um den Kegel bildet. Die Flanken des Teide sind bedeckt von Lavaströmen der Ausbrüche in

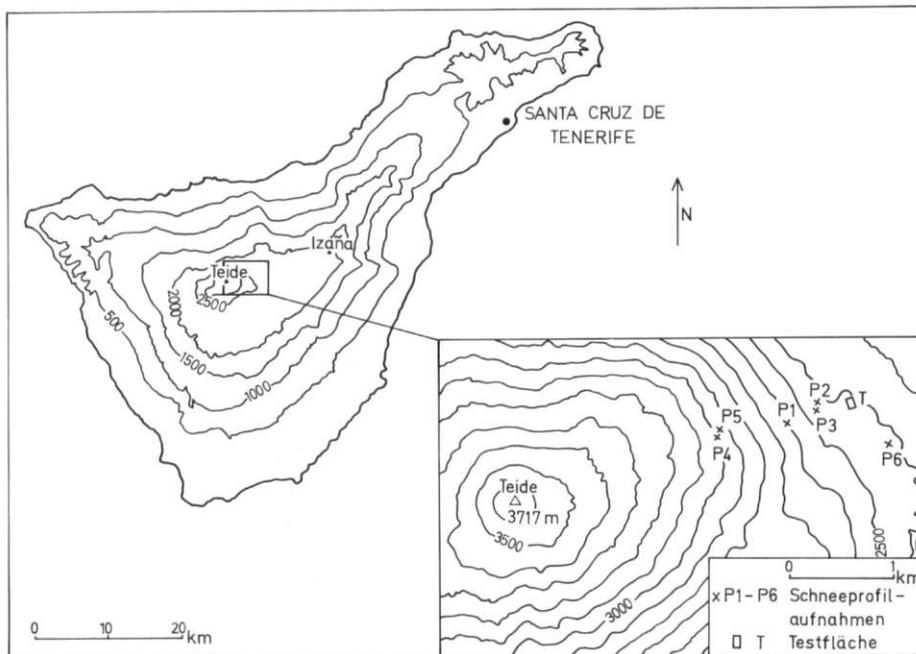


Abb. 1: Geographische Lage des Untersuchungsgebietes am Pico de Teide (Teneriffa)
Location of the research area at the Pico de Teide (Tenerife)

historischer Zeit und von Aschen, Lapilli und Schlacken, die während der Eruptionen abgelagert wurden.

Am Pico de Teide fällt regelmäßig im Winterhalbjahr ein großer Teil des Jahresniederschlags als Schnee. Die Schneedecke bleibt in den großen Höhen vor allem in Schattenlagen und im Lee des Berges oft viele Wochen erhalten. Sie reicht kurzzeitig an der Nordabdachung des Teide bis auf 1500 m und an der Südabdachung auf 1750 m ü. M. bis in die montane Stufe hinab (HÖLLERMANN 1982). Über diese allgemeinen Angaben zur Verbreitung und Dauer der Schneebedeckung hinaus liegen keine systematischen Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Schneedeckenentwicklung in Hochteneriffa vor, so daß die Angaben über Verdunstung und Abfluß aus der Schneedecke spekulativ bleiben. Die Voraussetzungen für schneehydrologische Untersuchungen sind besonders günstig, da die nötige Infrastruktur (Fahrstraße bis in 2200 m. ü. M.) vorhanden ist und in unmittelbarer Nähe (11,5 km Luftlinie) das meteorologische Observatorium Izaña (2367 m ü. M.) liegt (Abb. 1). Das Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt hier 9,3 °C (KÄMMER 1974), der mittlere Jahresniederschlag 369 mm (1922–41).

Das Ziel der Untersuchungen war es, die Kenntnisse über den Schneedeckenabbau in Hochgebirgen der Subtropen zu erweitern. Daher sollten Umwand-

lungen in der Schneedecke und der Anteil des Schmelzwasserabflusses erfaßt werden. Kleinformen des Büßerschnees, die im Untersuchungsgebiet schon von TROLL (1942) beschrieben wurden, weisen auf den Einfluß der Verdunstung und der Sublimation beim Abbau der Schneedecke hin.

2 Meßprogramm

2.1 Schneehydrologische Aufnahmen

Die Schneedeckenaufnahmen erfolgten in der Zeit vom 26. 2.–21. 3. 1990 am ENE-Hang des Pico de Teide in 2400 m bis 3000 m ü. M. (Abb. 1). Es wurden in drei verschiedenen Höhen an insgesamt sechs Standorten Schneeprofile nach den Richtlinien in UNESCO/IASH/WMO (1970) aufgenommen. Profile in gleicher Höhenlage berücksichtigen unterschiedliche Strahlungsexpositionen. Der Ausaperungsverlauf eines Schneefleckes in 2410 m ü. M. wurde mit Hilfe von Schneegewicht und Schneehöhenmessungen mit einem Schneeausstechrohr (Schneesonde) verfolgt. Die Schneeprofilaufnahmen ergänzte ein Kleinlysimeter, in dem sich der Schmelzwasserabfluß aus einer südexponierten Testfläche sammelte.

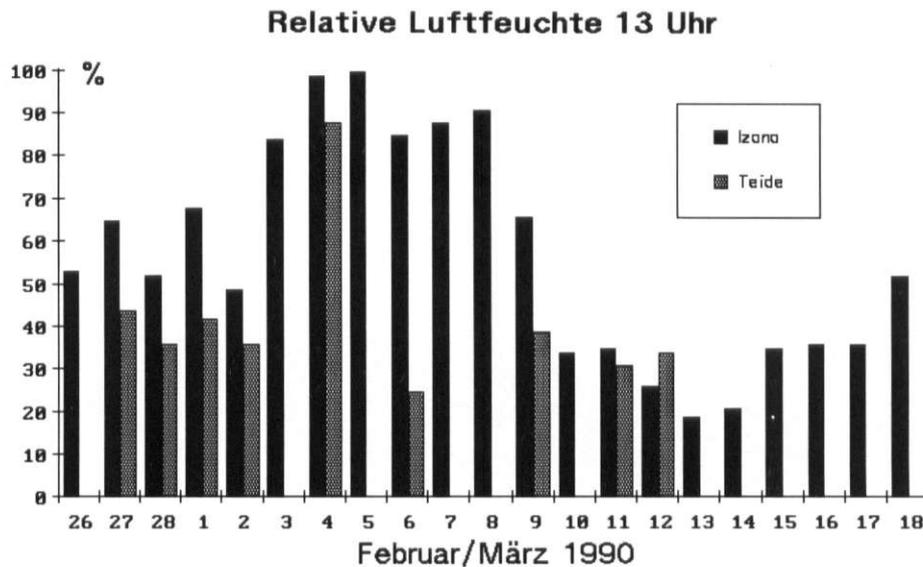


Abb. 2: Relative Luftfeuchte im Meßzeitraum am Pico de Teide und an der meteorologischen Station Izaña

Relative humidity of the air during the investigation period at the Pico de Teide and at the Izaña meteorological observatory

2.2 Meteorologische Messungen, Witterungsverlauf

Messungen der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte an den Profilstandorten zeigen, daß Unterschiede im Vergleich mit den Meßwerten der Meteorologischen Station Izaña auftreten. So lag die Lufttemperatur an den Meßflächen am Teide in der Regel um einige Grad höher, die relative Luftfeuchte aber um durchschnittlich 20% niedriger (Abb. 2). Die Unterschiede sind in erster Linie auf die Lage der meteorologischen Station auf einem isolierten Berg Rücken zurückzuführen (Abb. 1), während an den z. T. schon aperen Hängen des Teide eine Heizfläche vorliegt, die die Lufttemperaturen auch in Höhen um 3000 m ü. M. noch über 10 °C steigen ließen. Die Intensität der Erwärmung der Oberflächen konnte durch Messungen mit einem Infrarotthermometer belegt werden. Die Temperaturen an der Schneedeckenoberfläche, die mit diesem Gerät ebenfalls bestimmt wurden, lagen in einigen Fällen über 0 °C (Tabelle 1). Der absolute Meßfehler liegt dabei im Bereich weniger Zehntel Grad. Zur Messung von Erwärmung und Abkühlung der Schneeoberfläche oder auch zum direkten Vergleich unterschiedlicher Strahlenexpositionen läßt sich die Infrarotmeßmethodik gut einsetzen.

Während der Meßperiode fiel kein Niederschlag. Den letzten, leichten Schneefall registrierte die Station Izaña am 16. Januar 1990. Die Schneerücklage baute sich während einer kräftigen Schneefallperiode

um die Jahreswende auf. Im Zeitraum von Oktober 1989 – März 1990 fielen insgesamt 598 mm Niederschlag (162% des langjährigen Mittels). Die Tagesmittel der Lufttemperaturen (Abb. 3) stiegen in der letzten Januardekade von 0 °C auf zunächst 5 °C und lagen in den ersten zwei Dekaden des Februar bei 10 °C. In der dritten Februardekade sanken die Lufttemperaturen und erreichten ab dem 3. März negative Werte. Ab dem 6. 3. stiegen die Tagesmittel der Lufttemperaturen während einer intensiven Wärmeperiode bis nahezu 15 °C an.

3 Die Schneedeckenentwicklung an den Profilstandorten

3.1 Schneedeckenbeschaffenheit

3.1.1 Schneehärte und Schneedichte

Die Schneedecke wies schon bei Meßbeginn in allen Höhenlagen (NE-Exposition) eine sehr große Härte auf, die im tiefgelegenen Profil 3 (2425 m ü. M.) durchgehend bis zur Basis reichte, während in den hochgelegenen Profilen 1 (2600 m ü. M.) und 4 (2970 m ü. M.) die untersten Schneeschichten lediglich hart waren (Abb. 4). Die Schneehärten nahmen im Meßzeitraum in allen Höhen zu:

- Im Profil 3 wuchsen an der Basis immer mächtigere Eisschichten, die aufgrund ihrer extremen Härte kaum beprobt werden konnten. Am 9. 3. und 12. 3.

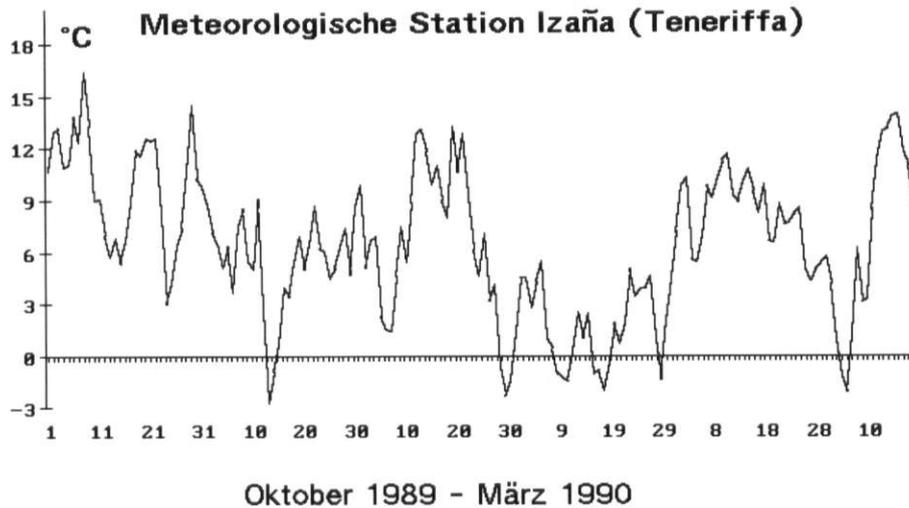


Abb. 3: Tagesmittel der Lufttemperatur im Winterhalbjahr 1989/90 an der Station Izaña

Daily average of air temperature in the winter of 1989/90 at the Izaña meteorological observatory

weicht die Schneedecke bei steigenden Lufttemperaturen und intensiver Einstrahlung oberflächennah auf.

- Die sehr harte Schneeschicht dehnt sich im Profil 1 bis zum 9. 3. 1990 kontinuierlich von der Oberfläche der Schneedecke zur Basis aus. Eine weiche Auftauschicht tritt auch hier an der Oberfläche auf. Sie ist jedoch im Vergleich mit dem Profil 3 geringer mächtig (max. 5 cm).
- Die Schneehärte entwickelt sich am höchstgelegenen Profil 4 sehr ähnlich wie am Profil 1, aufgrund der geringeren Lufttemperaturen jedoch zeitlich verzögert.

Die Profile 2 und 5 (Abb. 5) zeigen, daß die Verhältnisse auch in anderen Expositionen nicht von den beschriebenen abweichen. Profil 6 in SSW-Exposition weist deutlich höhere Rücklagen auf als die übrigen Profile, so daß die Schneedeckenentwicklung nicht direkt vergleichbar ist. Die Schneedichteänderungen in den Profilen zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Schneehärte (Abb. 4 und 5). In den Eisschichten ließen sich die Schneedichten aufgrund der extremen Härte nicht mehr durch Sondenmessungen bestimmen. Sie wurden daher mit einem Wert von 800 kg/cbm geschätzt, können aber durchaus noch höher sein.

Die Schneehärtebestimmungen ergaben, daß die unteren Schichten der hochgelegenen Profile mit einer zeitlichen Verzögerung ihre größte Härte erreichten. Daher ist die mittlere Schneedichte der Profile bei Meßbeginn in den unteren Lagen höher als in den oberen. Mit fortschreitender Ablation kehrt sich

diese Situation aber nicht um, sondern bleibt auch in der Ausaperungsphase erhalten (Abb. 6). Korrelationsrechnungen für den Zusammenhang von Schneedichte und Höhe über Meer ergaben für die NE-exponierten Profile Koeffizienten nahe -1:

- Zeitraum 26. 2.- 1. 3. 1990: $r = -0,999$;
 $b = -11,5 \text{ m/kg/cbm}$ ($n = 3$)
- Zeitraum 1. 3.- 2. 3. 1990: $r = -0,998$;
 $b = -4,9 \text{ m/kg/cbm}$ ($n = 3$)
- Zeitraum 4. 3.- 6. 3. 1990: $r = -0,996$;
 $b = -7,5 \text{ m/kg/cbm}$ ($n = 3$)
- Zeitraum 11. 3.-12. 3. 1990: $r = -0,977$;
 $b = -5,6 \text{ m/kg/cbm}$ ($n = 3$)

Die Anzahl der Stichprobe ist für eine gesicherte Aussage zu gering. Dennoch ist der dargestellte Trend (Abb. 7), der sich auch in anderen Expositionen zeigt, so eindeutig, daß geklärt werden muß, warum die in den Hochgebirgen der gemäßigten Breiten beobachtete Zunahme der Dichte mit der Höhe (HERRMANN 1978, ALFORD 1967) hier ins Gegenteil umschlägt (vgl. Abschn. 4).

3.1.2 Temperatur und der Gehalt flüssigen Wassers in der Schneedecke

Die Frosthalte der Schneedecke am Pico de Teide sind gering. Bei Schneehöhen unter 30 cm treten in den Profilen negative Temperaturen nur an der Oberfläche nach nächtlicher Ausstrahlung auf. Die Homothermie bei 0 °C ist darauf zurückzuführen, daß die Strahlung schon den Untergrund erreicht und die Schneedecke auch von der Bodenoberfläche erwärmt. Auch bei größeren Schneehöhen liegt die

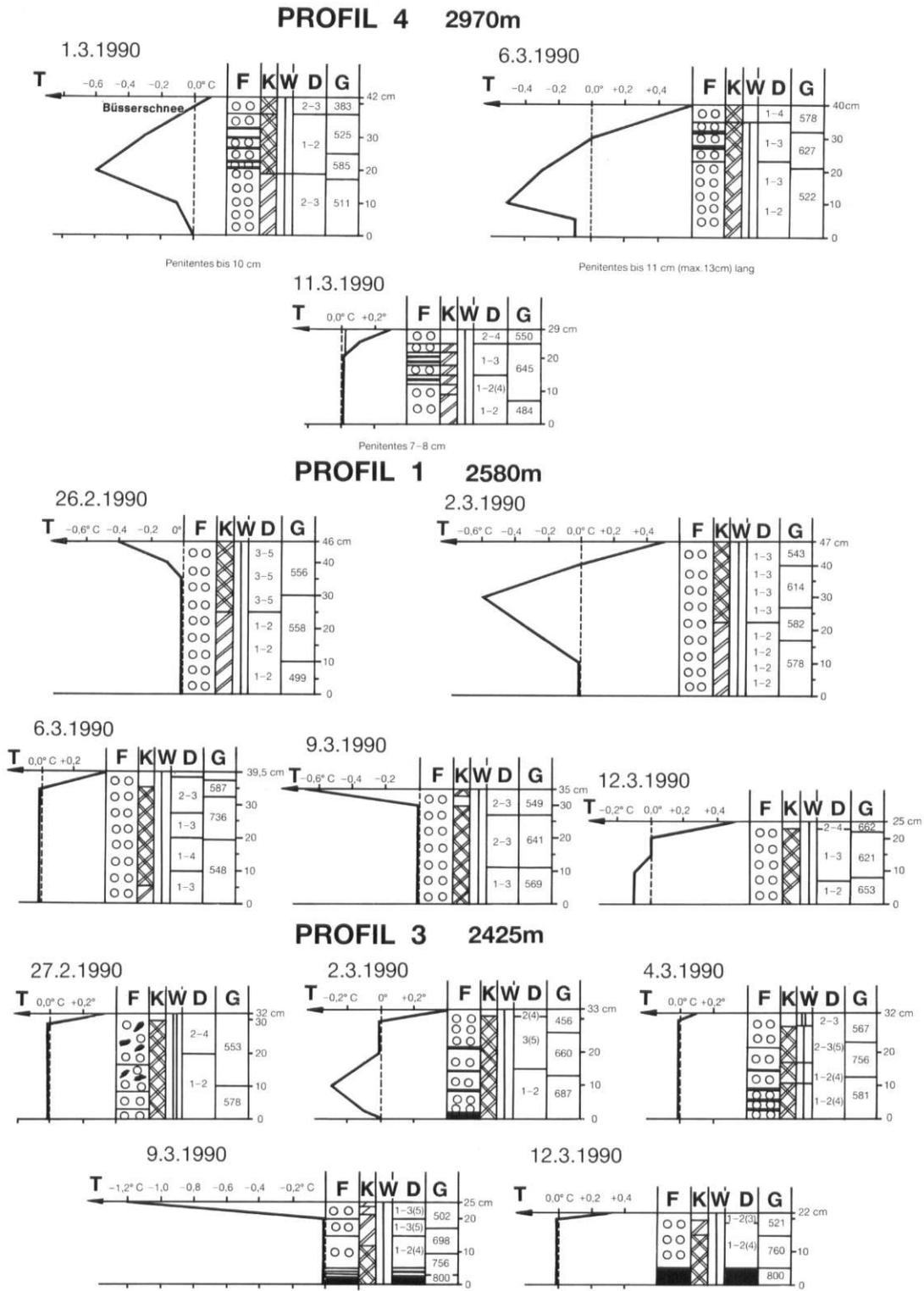


Abb. 4: Schneeprofilaufnahmen an NE-exponierten Standorten des Pico de Teide (Legende siehe Abb. 5, Lage der Standorte siehe Abb. 1)

Snow profile investigations from NE-exposed positions at the Pico de Teide (for key see Fig. 5, for location of snow profiles see Fig. 1)

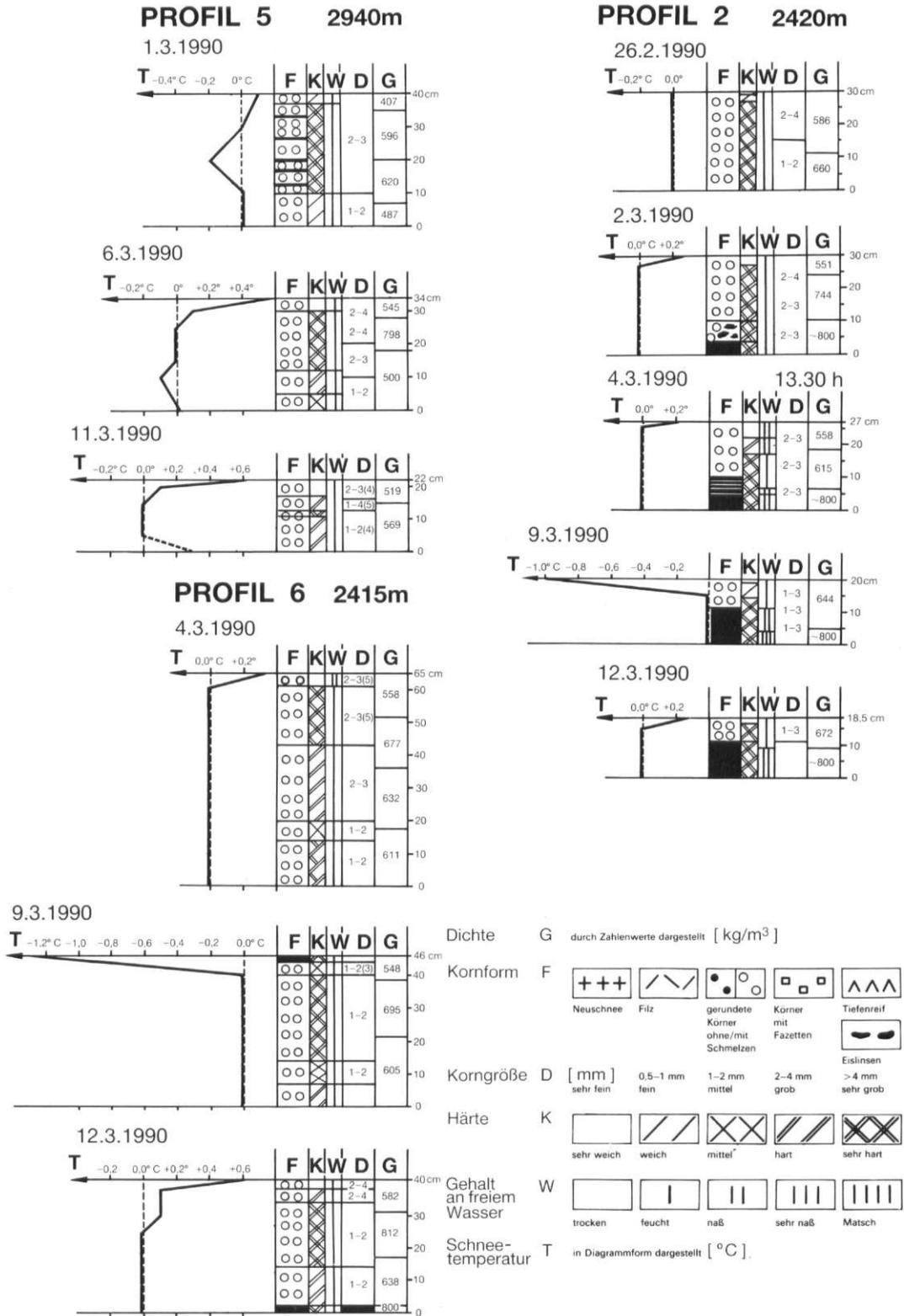


Abb. 5: Schneeprofilaufnahmen am Pico de Teide (Lage der Standorte siehe Abb. 1)
Snow profile investigations at the Pico de Teide (for location of snow profiles see Fig. 1)

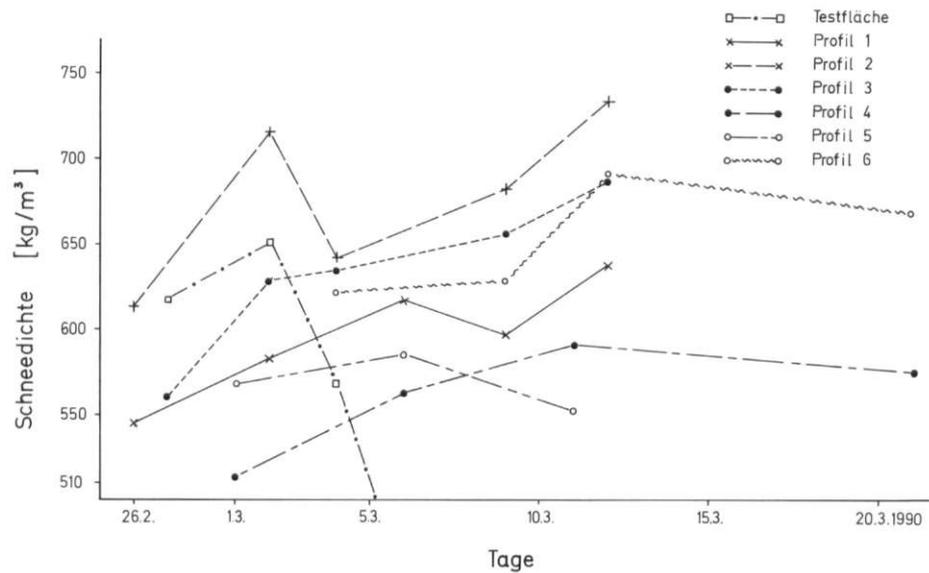


Abb. 6: Entwicklung der Schneedichte an den Meßflächen am Pico de Teide
Development of the density of the snow cover at the test areas at the Pico de Teide

Schneetemperatur an der Basis der Profile in der Regel bei 0°C . Während Kältephasen kühlt die mächtigere Schneedecke aus, so daß in den oberen Straten der Profile 1, 4 und 5 negative Temperaturen erreicht werden. An der Basis weist nur das höchstgelegene Profil 4 leicht negative Temperaturen auf (Abb. 4). In Südexposition sind die Frostgehalte geringer als in Nordexposition. Der Unterschied wird durch erhöhten Strahlungsgewinn erklärt.

Die Temperatur an der Schneedeckenoberfläche wird durch die direkte Einstrahlung und dadurch bedingte Schmelzprozesse bestimmt. Sie ist durch Thermometermessungen nur schwer festzustellen, da der Kontakt des Meßfühlers mit dem verharschten Schnee nur unzureichend hergestellt werden kann. Die angeführten Temperaturen sind mit dieser Einschränkung zu betrachten. Es zeigt sich, daß die

Temperatur an der Schneeoberfläche in Schattenschichten negative Werte annimmt. Deutlicher wird der Temperaturverlauf an der Schneeoberfläche, wenn man sie mit einem Infrarotthermometer mißt (Abb. 8). Die Oberflächentemperatur sinkt, sobald eine Schneefläche in den Schatten kommt, innerhalb weniger Minuten auf mehrere Grad unter den Gefrierpunkt. Obwohl die Minimumtemperaturen an der Schneeoberfläche in den Nächten bis auf -11°C absanken, waren die Frostgehalte in der obersten Schicht bis zum Zeitpunkt der Profilaufnahmen, also innerhalb weniger Stunden am Vormittag, wieder abgebaut.

Zwischen dem 4. 3. und dem 6. 3. 1990 lag eine Wolkenschicht am Hang des Teide bis in ca. 2600 m ü. M., die nur selten die höchstgelegenen Profilmesspunkte erreichte. Die Lufttemperaturen über Fels

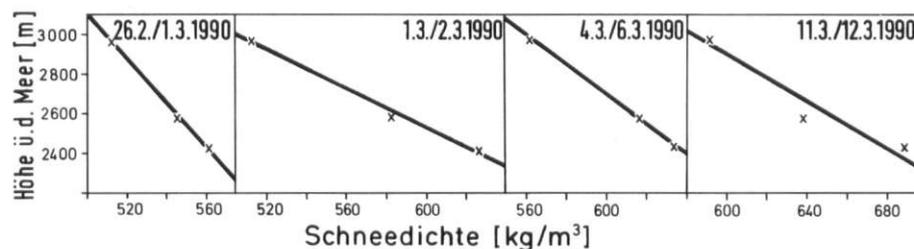


Abb. 7: Zusammenhang von Schneedichte und Höhe über dem Meer an nordostexponierten Standorten des Pico de Teide
Correlation between snow density and altitude above sea level at the NE-exposed snow profiles at the Pico de Teide

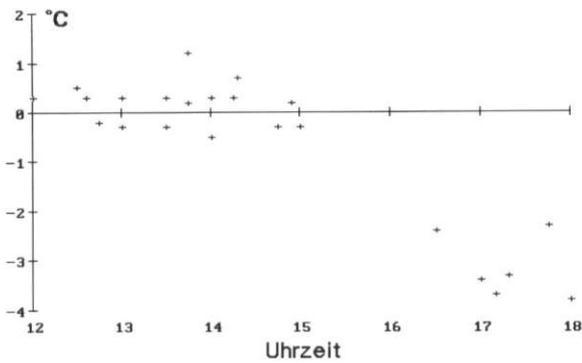


Abb. 8: Temperaturen an der Schneedeckenoberfläche des Pico de Teide im März 1990

Temperatures at the snow surface in March 1990 at the Pico de Teide

waren mit 1–4 °C niedriger als an Strahlungstagen (6–10 °C, max. über 20 °C). Dennoch baute sich der Kältegehalt in der Schneedecke ab (Profile 3, 1, 4; Abb. 4), da bei relativen Luftfeuchten nahe 100% keine Energie zur Sublimation und Verdunstung verbraucht wurde und ein Dampfdruckgefälle zur Schneeoberfläche bestand. Der Wassergehalt der Wolken führt auch zur Ablagerung von Tröpfchen an der Schneeoberfläche. Dieser Vorgang wurde durch die herrschende Ventilation noch verstärkt. Die Station Izaña registrierte am 4. 3. 1990 um 13 Uhr eine Windgeschwindigkeit von 37 km/h. Die Profile 2, 3 und 6 (Abb. 4 u. 5), die am 4. 3. 1990 bei dichtem Nebel aufgenommen wurden, zeigen daher eine nasse Schneeschicht an der Oberfläche. An Strahlungstagen herrschen in der Schneedecke an allen Profilen durchweg feuchte Verhältnisse. Höhere Wassergehalte treten nur in Schneedecken geringerer Mächtigkeit (Profil 2, 9. 3. 1990) auf, wenn die Strahlung die Schneerücklage auch vom Boden her abbaut, so daß das Schmelzwasserangebot höchste Werte während der Meßperiode erreicht.

In den tiefgelegenen Profilen reichert sich über dem Boden während der Wärmeperiode Mitte März Wasser an. Die Infiltration in den gut wasserwegigen vulkanischen Auswurfprodukten wird am Teide real durch Bodengefrorenis, die an der Bodenoberfläche ansetzt, stark behindert. Der Boden war überall dort hart gefroren, wo auch Schmelzwasser aus der Schneedecke zur Verfügung stand (vgl. auch HÖLLERMANN 1982), obwohl an der Bodenoberfläche bei der intensiven täglichen Einstrahlung Temperaturen von bis zu 40 °C gemessen wurden. Unter einer Schicht aus Tuffgeröllen, die sehr gut isolieren, friert das in die oberste Bodenschicht infiltrierte Schmelz-

wasser in der Nacht und bildet einen Bodeneishorizont, der verhindert, daß weiteres Schmelzwasser in den Untergrund abfließt. Bei starker Ausstrahlung in den Nächten gefriert auch das in den Basisschichten des Schnees gestaute Wasser zu einer massiven bis zu 11 cm mächtigen Eisschicht (Profil 2, Abb. 5).

Die Schneedecken der hochgelegenen Profilstandorte 1, 4 und 5 zeigen bis zum 2. 3. 1990 an der Basis keine Eisschichten, die in den Profilen tieferer Lagen (2, 3) schon gut entwickelt sind. Die für die Bildung von Eislinsen erforderliche Schmelzwasserproduktion ist aufgrund der niedrigeren Lufttemperaturen in den Hochlagen geringer. Am 1. 3. 1990 lag die Lufttemperatur über der Schneedecke am Profil 4 (2970 m ü. M.) bei +3,0 °C, während am Profil 2 (2420 m ü. M.) 10,0 °C gemessen wurden. Dies entspricht einem Gradienten von 1,3 °C/100 m. Am 6. 3. 1990 ergab sich zwischen Profil 1 und 4 mit 1,4 °C/100 m ein sehr ähnlicher Gradient. Die Infiltrationstiefe des an der Schneeoberfläche gebildeten Schmelzwassers in die Schneedecke ist in den Hochlagen geringer, wie die hier deutlich dünneren Eisschichten in mittleren Profiltiefen zeigen.

3.2 Abbau der Schneedecke

3.2.1 Ablationsraten

Auf der Basis der Schneeprofilaufnahmen ist keine exakte Bestimmung der Ablationsraten möglich, da die Schneedecke auf sehr grobem vulkanischen Schutt liegt und der Ort des Profils von einem Aufnahmetermin zum nächsten geringfügig verlegt werden muß, um ungestörte Schneeschichten untersuchen zu können. Dieser Ortswechsel führt dazu, daß das Schneewasseräquivalent auch ohne Niederschlagsereignis an einigen Standorten zunehmen kann, obwohl es aufgrund der intensiven Strahlung und der hohen Lufttemperaturen abnehmen müßte. Eine nennenswerte Reifbildung während der starken Ausstrahlung in den Nachtstunden konnte nicht beobachtet werden.

Die Entwicklung der Wasseräquivalente in der Schneedecke (Abb. 9) zeigt an allen Profilstandorten einen sehr ähnlichen Verlauf. In der Zeit zwischen dem 2. 3. und dem 12. 3. 1990 ergaben sich folgende mittlere Massenverluste:

Höhenlage ca. 3000 m ü. M.:
 Profil 4 (NE, 28° Neigung) 5,3 mm/d
 Profil 5 (SSW, 17° Neigung) 13,4 mm/d
 Höhenlage ca. 2600 m ü. M.:
 Profil 1 (NE, 30° Neigung) 10,2 mm/d

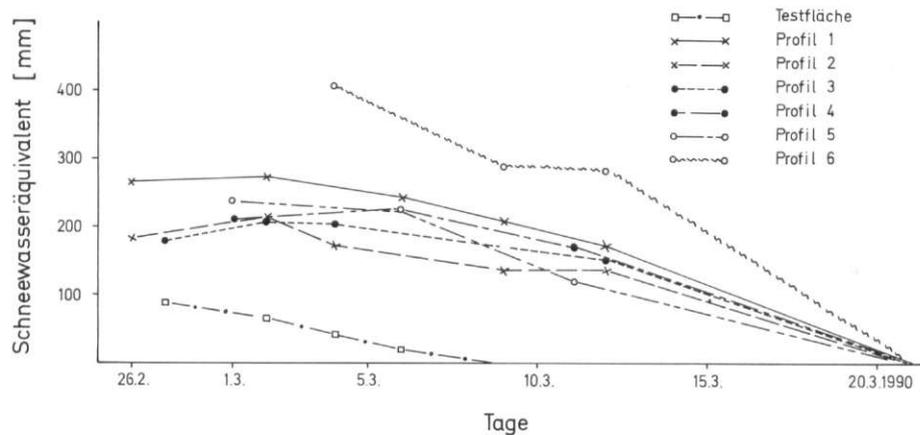


Abb. 9: Entwicklung der Schneerücklagen am Pico de Teide während der Ablationsperiode im Frühjahr 1990
Development of the snow-water equivalent at the Pico de Teide during the ablation period in spring, 1990

Höhenlage ca. 2400 m ü. M.:

Profil 2 (NW, 16° Neigung) 7,9 mm/d

Profil 3 (NE, 20° Neigung) 5,6 mm/d

Profil 6 (SE, 15° Neigung) 15,4 mm/d

In Südlagen liegen die Ablationsraten deutlich höher als in Nordlagen. Dieses Ergebnis ist zu erwarten. Ungewöhnlich und zunächst unerklärlich ist die fehlende Höhenabhängigkeit der Abschmelzraten in Schattenlagen. Die höchsten Werte treten nicht in tiefen Lagen sondern am Profil 1 (10,2 mm/d) auf. Es ist damit zu rechnen, daß sich das Schmelzwasser in der Schneedecke in Richtung des Hanggefälles bewegt, da Eisschichten in der Schneedecke und Bodengefrorenis eine rasche Infiltration in den Boden verhindern. Damit kann besonders an steilen Hangteilen (Profile 1, 4) mehr Schmelzwasser abgeführt werden als an flachen Hängen in tieferen Lagen (Profile 2, 3), wo es zu einem Wasserstau über dem Boden kommt (Abb. 5, Profil 2). Im beobachteten Höhenintervall dominieren offenbar die Einflüsse des Mikroreliefs, wie es auch schon für den Ablationsverlauf an alpinen Hängen gezeigt wurde (BECHT et al. 1984). Über ein Intervall von 600 Höhenmetern betrachtet, beeinflusst die Strahlungsexposition den Ablationsverlauf stärker als die Höhenlage (Profil 5: 13,4 mm/d).

Die Massenverluste und der Ausaperungsverlauf einer geringmächtigen Schneedecke (max. Schneehöhe 15,5 cm) wurde an einem Schneefleck mit Schneesonden erfaßt. Die Fläche fällt mit 10° nach Norden ein. Die Ablationsraten schwankten nur gering und lagen in der Zeit vom 27. 2. 1990 bis 6. 3. 1990 zwischen 10,4 mm/d und 11,1 mm/d. Nach Abbildung 9 waren sie hier höher als an den Profilstandorten, da die Strahlung durch die Schneedecke

dringt und den Boden erwärmt. Der Osthang des Teide war bis zum 21. 3. 1990 aper. Der mittlere Massenverlust an den Meßorten stieg in der Zeit vom 12. 3.-21. 3. 1990 auf Spitzenwerte von mehr als 30 mm/d in Südlagen an (Profil 6). Damit wurde die Größenordnung der Ablationsraten, die in der montanen Stufe der Alpen während der Frühjahrsablation auftreten, erreicht (BECHT et al. 1984).

3.2.2 Abfluß aus der Schneedecke

In unmittelbarer Nähe zum Profil 6, das aufgrund der südexponierten Lage in 2410 m ü. M die größten Ablationsraten aufwies (vgl. 3.2.1), wurde bei Meßbeginn ein Schneelysimeter eingebaut. Die Schneedecke wurde dazu an einer Wächtenkante abgestochen, so daß aus der weicheren Schicht über dem Boden ein etwa 10 cm mächtiger Teil entnommen werden konnte. Direkt über dem Boden wurde anschließend eine flache Plastikwanne (40 × 40 cm), die mit einem Ablauf und einem Laborschlauch versehen war, eingebracht und im Schnee eingegraben. Das Schlauchende steckte in einem Plastikkanister, der im Boden vergraben wurde.

In der Kältephase Anfang März wurde zunächst kein Abfluß aufgefangen. Da auch die Massenverluste an den Profilstandorten in dieser Zeit sehr gering waren (Abb. 9), ist nicht davon auszugehen, daß die mit dem Einbau des Lysimeters in die Schneedecke verbundene Störung der Struktur der unteren Schichten als Ursache für den fehlenden Abfluß herangezogen werden kann. In der Zeit zwischen dem 9. 3. und 12. 3. 1990 wurden an den Profilen Massenverlust bis zu 20 mm/d gemessen. In dieser Zeit ergab sich ein Lysimeterabfluß von 0,7 mm/d. Ein direkter Vergleich einzelner Profilaufnahmen ist hier nicht

sinnvoll, da die Schneerücklagen aufgrund der Rauigkeit des Untergrundes räumlich große Schwankungen aufweisen. Nimmt man daher die mittlere Ablation an den Profilstandorten, die schon in Abschnitt 3.2.1 herangezogen wurde, als Vergleichswert, dann liegt der Lysimeterabfluß in der Größenordnung zwischen 5% und 15% der mittleren Ablationsrate. Berücksichtigt man einerseits, daß die Kälteperiode Anfang März sicherlich zu einer Reduktion der mittleren Ablationrate führte, und andererseits, daß die Lysimetermessung auf 2410 m ü. M. in Südexposition erfolgte, dann ist in hochgelegenen Schattenlagen nur in Ausnahmefällen mit geringem Abfluß zu rechnen. In Südlagen dagegen fließt ein Teil des Schmelzwassers während strahlungsreicher Wärmeperioden ab. Wie hoch dieser Anteil ist, sollten weitere Messungen in Zukunft zeigen. Die Ergebnisse im Frühjahr 1990 lassen vermuten, daß er 20% des Massenverlustes kaum übersteigt.

Das Schmelzwasser wird von den porösen Aschen und Tuffen an der Bodenoberfläche aufgenommen. Die Bodengeformnis erschwert die Infiltration in den Untergrund (vgl. 3.1.2), so daß die Feuchtigkeit von der stark aufgeheizten Oberfläche wieder verdunstet. Auf Schlacken und Tuffen wurden Oberflächentemperaturen von mehr als 30°C gemessen. Oberflächenabfluß tritt daher während der Schneeschmelze selbst an den steilsten Hängen des Teide nicht auf, obwohl Schmelzwasser aus der Schneedecke abfließt.

3.2.3 Sedimentation auf der Schneedecke

Nach Abschnitt 3.2.1 erreichen die Ablationsraten im Verlauf der Ausaperung (2. Märzdekade) ihre maximalen Werte. Sedimentablagerungen auf der Schneedecke führen zu einer Verringerung der Albedo (bedeckte Ablation, KRAUS 1966), so daß der Abbau der Rücklagen beschleunigt wird, wenn die Sedimentbedeckung nicht so mächtig ist, daß sie die Schneedecke gegenüber der Einstrahlung isoliert. Die Schneeprofile waren bei Meßbeginn noch weitgehend frei von eingewehten, minerogenen Verunreinigungen. Die meteorologische Station Izaña registrierte im Zeitraum von Anfang Januar (Schneeablagerung) bis Mitte März Spitzenwerte der Windgeschwindigkeit von 80 km/h (Abb. 10). Gegen Ende der zweiten Märzdekade wurden dann bis 126 km/h am 20. 3. 1990 gemessen. Die Windgeschwindigkeiten am Teide lagen möglicherweise noch darüber. Eine aufrechte Fortbewegung während der Böen war nicht mehr möglich.

Auf der Schneeoberfläche am Hang des Teide wurden bis zum 21. 3. 1990 in 2420 m ü. M. 38,3 g/qm und in 3000 m ü. M. 33,7 g/qm äolisch transportiertes Sediment abgelagert. Eine weitere Probe wurde am Hangfuß auf einer Verebnung in 2400 m ü. M. entnommen (22,0 g/qm). Die Windgeschwindigkeit scheint am Hang des Teide höher zu sein als in der Ebene, so daß es am Hang zu stärkerem Transport kommt. Dabei wirkt das Angebot hinreichend feinkörnigen Materials modifizierend auf die Menge des

Maximale Windgeschwindigkeit Station Izaña (Teneriffa)

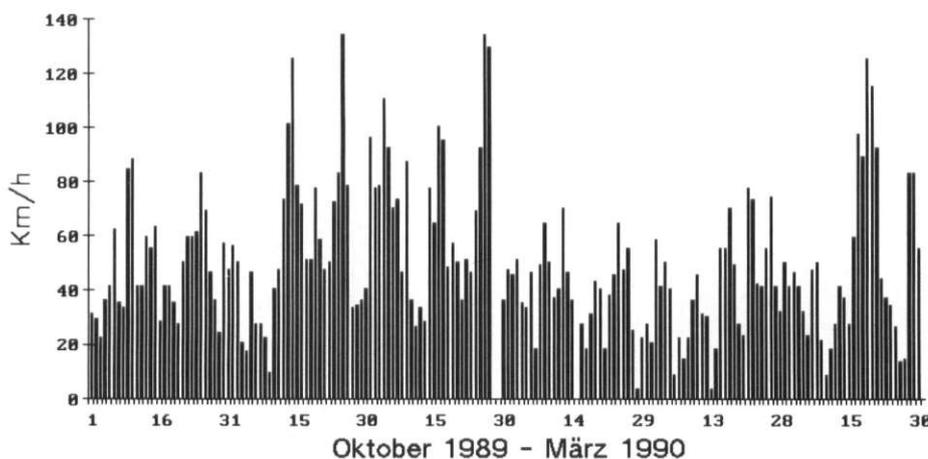


Abb. 10: Tägliche Maxima der Windgeschwindigkeit im Winter 1989/90 an der Station Izaña
Daily maxima of wind speed in the winter 1989/90 at the Izaña meteorological observatory

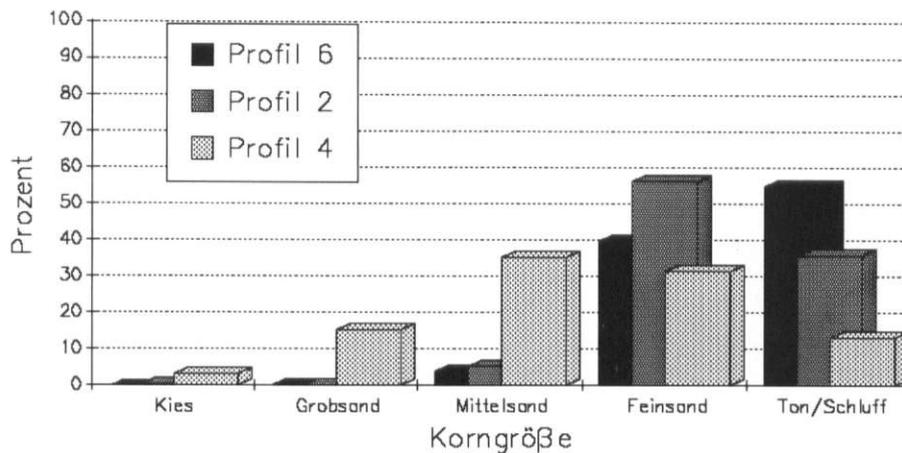


Abb. 11: Korngrößenzusammensetzung äolischer Sedimente auf der Schneedeckenoberfläche am Pico de Teide (Probenahme am 20. 3. 1990)

Grain-size distribution of eolian sediments from the snow surface at the Pico de Teide (taken on 20/3/1990)

Sedimenttransportes, so daß am Oberhang bei vorherrschend grobem vulkanischen Lavagestein quantitativ weniger Sedimente auf der Schneedecke akkumuliert wurden. Die Korngrößenverteilung der äolischen Ablagerungen (Abb. 11) zeigt deutlich, daß die Sedimente auf der Schneeoberfläche in den Hochlagen einen höheren Sand- und Kiesanteil aufweisen. Die mittlere Korngröße liegt in der Ebene bei 0,095 mm, am Unterhang bei 0,150 mm und am Oberhang bei 0,536 mm.

Hohe Windgeschwindigkeiten treten im Winterhalbjahr mehrfach am Teide auf. Die Schneeeblation kann durch die Akkumulation von Sedimenten auf der Schneedecke beschleunigt werden. Wie hoch der Anteil des Abflusses aus der Schneedecke beim Zusammentreffen hoher Windgeschwindigkeiten mit einer nachfolgenden Periode warmen Strahlungswetters ist, kann nur durch weitere Messungen geklärt werden. Auch auf die erste Schneefallperiode des Winters 1989/90 vom 12. bis 14. 11. 1989 folgten Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten (135 km/h am 25. 11., 111 km/h am 5. 12.), so daß davon auszugehen ist, daß der Teide bis zum erneuten Schneefall vollständig aper war.

3.2.4 Erscheinungsformen des Büßerschnees

Büßerschnee trat im Untersuchungsgebiet nur in Höhenlagen oberhalb etwa 2800 m ü. M. an strahlungsgeschützten NE-NW-Hängen (Profil 4) auf. Es sind Kleinformen mit einer Größe (Länge) bis zu 15 cm, die sich nach Süden neigen. Sie entwickeln sich am Teide episodisch in Abhängigkeit vom Witterungsgeschehen und unterscheiden sich dadurch von den Großformen, die beispielsweise in den Anden periodisch mit einer Entwicklungszeit von mehreren Monaten entstehen (TROLL 1942, LLIBOUTRY 1964).

Eine wichtige Voraussetzung für die Bildung der Penitentes ist eine harte Schneeoberfläche, die nicht durch tagesperiodische Schmelzvorgänge aufgeweicht wird. Hohe Lufttemperaturen, die vor allem in südexponierten Lagen gemessen wurden, verhindern daher die Entstehung dieser Oberflächenformen in den untersuchten Höhenstufen. In der Kälteperiode der ersten Märzdekade bildeten sich Penitentes am Profil 4 aus, obwohl auch hier positive Lufttemperaturen über der Schneedecke auftraten (1.3.: 3,0 °C; 6.3.: 7,5 °C). Die zeitgleich gemessenen Temperaturen an der Schneedeckenoberfläche lagen bei -0,2 °C (Tab. 1). Da auch die Schneehärte am 6. 3. 1990 an der Oberfläche sehr groß war, muß die Schmelzwasserproduktion geringer als die Verdunstung/Sublimation der Schneedecke sein. Die oberste Schneesicht ist daher auch am 6. 3. 1990 trocken (Profil 4, Abb. 4). Die relative Luftfeuchte lag während der Mittagsstunden zwischen 20% und 30%, so daß nach MÜLLER (1953) erst bei einer Lufttemperatur über etwa 5–6 °C Schmelzen auftreten kann. Die gemessenen Lufttemperaturen lagen in der Kälteperiode unter oder nur kurzzeitig etwas über diesem Wert, während sie in der Wärmephase der zweiten Märzdekade, in der die Penitentes rasch zerstört wurden, in Schattenlagen auf mehr als 13 °C anstiegen. Die Schneedecke war dann an der Oberfläche feucht und weich (Profil 4, Abb. 4) und wies keine negativen Temperaturen auf (Tab. 1).

Tabelle 1: Mittagstemperaturen an der Schneedeckenoberfläche und in der Luft (50 cm über der Schneeoberfläche) am Pico de Teide
 Midday temperatures at the snow surface and in the air (50 cm above the ground) at the Pico de Teide

Datum	Profil	Höhe ü. M. (m)	Exposition	Luft- temperatur (°C)	Schneedecken- oberfläche (°C)	Minimum- temperatur (2420 m)
27. 2. 1990	2	2420	NW	+ 7,0	+ 0,3	- 5,5
1. 3. 1990	4	2970	NE	+ 3,0	- 0,2	- 5,5
	5	2940	SSW		+ 0,3	
2. 3. 1990	3	2425	NE	+ 9,5	+ 0,5	- 5,4
4. 3. 1990	3	2425	NE	+ 3,5	+ 0,3	- 6,6
6. 3. 1990	4	2970	NE	+ 7,5	- 0,3	- 11,0
	5	2940	SSW	+ 10,3	+ 0,2	
	1	2580	NE	+ 13,0	- 0,3	
11. 3. 1990	4	2970	NE	+ 13,0	+ 0,2	
	5	2940	SSW	+ 23,7	+ 1,2(?)	
12. 3. 1990	1	2580	NE	+ 11,0		- 6,3
	3	2425	NE	+ 11,5	+ 0,3	
21. 3. 1990	4	2970	NE	+ 8,5	+ 0,3	- 6,2

An sonnenexponierten Hängen führten die hohen Lufttemperaturen in der Ablationsperiode 1990 (Tab. 1) über die Verdunstung hinaus zu Schmelzwasserbildung in der Schneedecke, so daß sich kein Büßerschnee bilden konnte. Die täglichen Minimumtemperaturen lagen im Untersuchungszeitraum an allen Profilen kontinuierlich unter dem Gefrierpunkt. Die Bildung der Penitentes in den unteren Lagen wie auch an südexponierten Hängen wird also durch höhere Mittagstemperaturen verhindert.

4 *Schlußfolgerungen*

Die Schneedecke am Teide wird durch Schmelzen, Verdunsten und Sublimieren abgebaut. Der Anteil der Prozesse variiert in Abhängigkeit von der Höhenlage der Schneedecke. Sublimation tritt quantitativ in den untersuchten Lagen zurück, da es aufgrund der starken Einstrahlung und hohen Lufttemperatur überwiegend zu Schneeschmelzvorgängen an der Oberfläche der Schneedecke kommt, so daß die obersten Teile der Profile aufweichen.

In niedrigen Lagen (2400 m ü. M.) führen höhere Tagesmaxima der Lufttemperatur zu einem erhöhten Schmelzwasserangebot, daß selbst bei dem hohen Sättigungsdefizit der Atmosphäre nicht mehr vollständig verdunsten kann. Es entsteht daher ein

Schmelzwasserfluß zur Basis der Schneedecke, wo das Wasser in den kalten Nächten mit starker Ausstrahlung gefriert. Diese Eisschichten bewirken einen Schmelzwasserstau in der Schneedecke. Die Infiltration in den oberflächennah gefrorenen Boden ist darüber hinaus erschwert. Der Anteil des Schmelzwasserabflusses aus der Schneedecke an der Gesamtablation lag im Untersuchungszeitraum bei 5–15%. Er kann sich erhöhen, wenn die Schneedecke durch äolisch transportierte Sedimente an der Oberfläche verschmutzt und damit die Albedo reduziert wird.

In den Hochlagen (3000 m ü. M.) zeigen die Schneeprofilaufnahmen, daß die Schneedecke einen größeren Kältegehalt, geringere Feuchte und besonders gegen die Basis eine geringere Härte besitzt. Eisschichten liegen in mittlerer Höhe (ca. 20 cm unter der Oberfläche) in der Schneedecke und sind im Vergleich zu den tiefer gelegenen Profilen sehr schwach entwickelt. Der geringere Schmelzwasseranfall in dieser Höhenstufe wird schon in den oberen Schichten gebunden, so daß sich ein Wärmetransport mit dem Schmelzwasser in die tieferen Teile der Profile erst mit abnehmender Schneehöhe in einer späteren Phase der Ablation einstellen kann.

Die Bildung von Penitentes erfolgte im Untersuchungszeitraum ausschließlich in den nördlich exponierten Hochlagen während einer strahlungsreichen Kältephase. Die Schmelzwasserproduktion an der Oberfläche war zu gering, um sie mit Hilfe der

Schneeprofilaufnahmen (6, 3; Profil 4) nachweisen zu können. Abfluß aus der Schneedecke fand in dieser Phase nicht statt. Der Schneedeckenabbau erfolgt langsam durch Verdunstungs- und Sublimationsverluste, wobei die Sublimation hier im Gegensatz zu den Profilaufnahmen in Tieflagen oder auch nur in südlich exponierten Schneedecken der Hochlagen einen höheren Anteil hat, da bei Lufttemperaturen von 3–6 °C und relativen Luftfeuchten von 20–30% kein Schmelzen auftritt (MÜLLER 1953).

Hinsichtlich des Schmelzwasseranteiles am Schneedeckenabbau zeigte sich ein deutlicher hypsometrischer Wandel, der sich auch in der negativen Korrelation der Schneedichte mit der Höhenlage der Meßstelle ausdrückt. Hochlagen weisen eine geringere Schmelzwasserproduktion auf, so daß hier die Schneedichte niedriger ist. Die Schneedichte und -härte ist am Teide im Vergleich mit den in den Gebirgen der gemäßigten Breiten aufgenommenen Schneeprofilen höher. Dies ist auf die beschriebenen Ablationsbedingungen zurückzuführen, wobei die Schneedecke fast täglich oberflächennah anschmilzt und in der darauffolgenden Nacht noch härter und dichter zusammenfriert. Die Schmelzwasserproduktion ist aufgrund der starken Verdunstung gering, so daß Sickerwasserbahnen nur wenig ausgebildet sind. Abfluß des freien Wassers aus der Schneedecke tritt nur in tiefen Lagen während Wärmeperioden auf. Verdunstung und Sublimation sind aber auch dann noch die für den Abbau der Schneerücklage dominanten Prozesse.

Danksagung

Dem Instituto Nacional de Meteorologia und insbesondere der Leiterin der Abteilung Klimatologie, Frau Carmen Ruz, möchte ich für die Überlassung der Daten der Station Izaña herzlich danken.

Literatur

- ALFORD, D.: Density variations in an alpine snow. In: *J. of Glaciol.* 6, 1967, S. 495–503.
- ANDERSON, H. W.: Forest-cover effects on snowpack accumulation and melt, Central Sierra Nevada Snow Laboratory. In: *Amer. Geophys. Union Trans.* 37 (3), 1956, S. 307–312.
- : Snow accumulation as related to meteorological, topographic, and forest variables in Central Sierra Nevada, California. In: *IAHS 76*, 1968, S. 215–224.
- BEATY, CH. B.: Sublimation or melting: Observations from the White Mountains, California and Nevada, U.S.A. In: *J. of Glaciol.* 14, 1975, S. 275–286.
- BECHT, M., KOPP, M. u. WILHELM, F.: Die zeitliche und räumliche Differenzierung der Schneedecke auf einzelnen Testflächen in einem randalpinen Niederschlagsgebiet im Spätwinter und während der Frühjahrsablation. In: *Mitt. Geogr. Ges. München* 69, 1984, S. 95–128.
- HÖLLERMANN, P.: Studien zur aktuellen Morphodynamik und Geoökologie der Kanareninseln Teneriffa und Fuerteventura. *Abh. d. Akad. d. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Kl. III*, 34, 1982.
- JUNGFER, E.: Wasserressourcen, Wassererschließung und Wasserknappheit im Maghreb. In: *Geog. Rundschau* 42 (2), 1990, S. 64–69.
- HERRMANN, A.: Schneehydrologische Untersuchungen in einem randalpinen Niederschlagsgebiet (Lainbachtal bei Benediktbeuren/Oberbayern). *Münchner Geogr. Abh.* 22, 1978.
- KÄMMER, F.: Klima und Vegetation auf Tenerife, besonders im Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica* 7, 1974, Göttingen.
- KRAUS, H.: Freie und bedeckte Ablation. *Ergebn. Forsch.-Unternehmen Nepal Himalaya*. Lief. 3. Berlin-Heidelberg-New York 1966, S. 203–236.
- LLIBOUTRY, L.: *Traité de Glaciologie*. Tome I: Glace - Neige Hydrologie Nival. Paris, 1964.
- MÜLLER, H. G.: Zur Energiebilanz der Schneedecke. In: *Met. Rundschau* 6 (7/8), 1953, S. 140–143.
- TROLL, C.: Büsserschnee in den Hochgebirgen der Erde. *Pet. Geogr. Mitt.*, Erg. H. 240, 1942.
- UNESCO/IASH/WMO: Seasonal snow cover. *Techn. Pap. in Hydrol.* 2. Paris, 1970.