

Der Verlauf der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern) Ergebnisse der Kartierung der temporären Schneegrenze ¹

Mit 4 Abbildungen und 10 Bildern im Text und auf den Tafeln I bis VII
und 2 Kartenbeilagen.

HEINZ SLUPETZKY, Salzburg

Inhalt

1. Problemstellung	3
2. Das Stubacher Sonnblickkees	6
3. Methoden zur Feststellung der Ausaperungsstände und der sommerlichen Änderung der temporären Altschneelinie	6
4. Begriffe und Definitionen — Probleme der Terminologie	9
5. Der Verlauf der Ausaperung und die Ausaperungsstadien am Stubacher Sonnblickkees	13
6. Schlußbetrachtung	21
7. Literaturverzeichnis	21
Zusammenfassung	22
Summary	23
Résumé	24

1. Problemstellung

Es ist eine bekannte Tatsache, daß bei der Niederschlagsverteilung der Wirkung des Reliefs eine große Bedeutung zukommt. Dies ist nicht nur beim Makrorelief der Fall, wie etwa bei ganzen Gebirgszügen und -ketten, sondern besonders auch im Meso- und Mikrorelief. In besonderem Maß ist die Hochgebirgsmeteorologie bemüht, die Fragen und Probleme, die sich aus der sehr unterschiedlichen Verteilung der Niederschläge im Hochgebirge ergeben, zu lösen [1]. Auch die Geographie, Botanik und andere Wissenschaften haben maßgebenden Anteil an der Erforschung. Der Botaniker H. FRIEDEL [2] hat die Bedeutung der Niederschlagsverteilung im Hochgebirge, die auftretenden Gesetzmäßigkeiten, die Erfassung des Niederschlages und die Verteilung der Schneedecke und ihre Ablagerungsgesetze eingehend gewürdigt. FRIEDEL [3] erkannte bei den Vegetationskartierungen in der Umgebung der Pasterze, daß in der alpinen Stufe der Grad der (Alt)Schneebedeckung ein entscheidender Faktor für die Differenzierung der Vegetation ist. In der nivalen

¹ Für die jahrelange Hilfe bei den Geländearbeiten und bei der Ausarbeitung des Untersuchungsmaterials danke ich meinem Bruder Werner Slupetzky, sowie Herrn Erich Kopeccky für die kartographische Bearbeitung der Gletscherkarten.

Stufe ist die Frage nach der Schneebedeckung gleichbedeutend mit der nach der Ernährung der Gletscher, FRIEDEL [2] S. 73. Es zeigte sich, daß die Ablagerung des festen Niederschlages nicht jährlich wechselt und nicht von Zufällen, sondern von bestimmten Gesetzmäßigkeiten abhängig ist. In erster Linie sind das Relief und der Wind als Faktoren für die regelhafte Akkumulation des Schnees verantwortlich. Es führt dazu, daß „alljährlich im Laufe der Ausaperung alpinen Geländes dieselben Konturlinien der Schnee- und Aperflecken fast haargenau wiederkehren“, FRIEDEL [2] S. 73. Die durch das gleichbleibende Relief des Geländes bedingte geländefeste Ausaperungsweise erfolgt in den einzelnen Jahren nur mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, die Stadien und Konturlinien von Schnee- und Aperfiguren kehren in den einzelnen Jahren in gesetzmäßiger Reihenfolge wieder.

Bei der Ablagerung (Akkumulation) des Schnees wirkt sich das Relief bzw. die Topographie der Oberfläche dahingehend aus, daß erstens Leeflächen gegenüber Luvflächen und zweitens Konkav- gegenüber Konvexflächen begünstigt werden, FRIEDEL [2] S. 76. Mit zunehmender Schneehöhe setzt aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit und der häufigen Schwankung der Windrichtung und Windstärke im Winter ein allmählicher Ausgleich der Reliefunterscheide ein. Er beginnt an kleineren Relieftteilen und schließt immer größere Geländewellen ein, bis ein von der Neigung abhängiges Gleichgewicht erreicht wird. Das Kleinstrelief wird auf diese Weise völlig ausgeglichen. Die weitere Anlagerung erfolgt ziemlich gleichmäßig. Im Kleinrelief, z. B. einem Hang, ist die Einebnung nicht unbedingt vollständig, sondern kann auch nur soweit fortschreiten, daß Geländeunebenheiten an einer Wellung der Schneedeckenoberfläche erkennbar bleiben. Auf alle Fälle ist die Oberfläche sanfter als das schneefreie Relief. Diesem Reliefeffekt ist ein weiterer, der Niveaueffekt überlagert, nämlich die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe. Hier tritt aber eine Umkehrung ein: Die Luvseiten sind gegenüber den Leeseiten bevorzugt. Die Ursache der gegensätzlichen Wirkung beider Effekte liegt darin, daß der Reliefeffekt durch die Horizontal-, der Niveaueffekt durch die Vertikalkomponente der Luftversetzung zustande kommt, FRIEDEL [2] S. 77.

Bei der Abschmelzung ist „vornehmlich die Dauer der Besonnung und die Intensität der Strahlung maßgebend“, H. QUECK [4] S. 32. Dieser Expositionseffekt ist aber nicht so deutlich ausgeprägt wie der Reliefeffekt, weil Besonnungsunterschiede dadurch ausgeglichen werden, daß die diffuse Himmelsstrahlung die Ablation unter Umständen mehr begünstigt als die direkte Strahlung, F. SAUBERER und I. DIRMHORN, 1950 nach H. QUECK [4] S. 32.

Insgesamt ist der Reliefeffekt weitaus am wirksamsten. Die Lage der sommerlichen Abschmelzungsgrenzen des Schnees werden schon im Winter durch die vorherbestimmten Ablagerungsbedingungen fast vollständig festgelegt, FRIEDEL [2] S. 82. Auch jährlich unterschiedliche Witterungsverhältnisse im Winter können nicht so groß sein, daß sie nicht vom Reliefeffekt dominierend überlagert werden. Die Verteilung von Schnee- und Aperflecken, die alljährlich gesetzmäßig wiederkehrt, ist eine Folge der Konstanz der Reliefform des Geländes, FRIEDEL [7] S. 75.

Aus den erkannten Gesetzmäßigkeiten der Niederschlagsverteilung läßt sich aber noch weiters ableiten: „Im Hochgebirge sind die tatsächlich abgesetzten Niederschlagsmengen etwas völlig anderes als die angebotenen Niederschlagsstärken“, FRIEDEL [2] S. 82. Dies ist für die Ernährungsbedingungen der Gletscher außerordentlich wichtig. Für die Gletscher ist es sekundär, wie hoch das

Niederschlagsangebot ist, zum Tragen kommt nur der tatsächlich abgelagerte Schnee (als Einnahme). Die Bedeutung des Schneetreibens und Schneefegens wurde von H. HOINKES [5] S. 27 ff. im Hinblick auf den Massenhaushalt eines Gletschers untersucht. Schneefall und Windverfrachtung müssen als ein Vorgang aufgefaßt werden. Am Gletscherkörper des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) ist mehr abgelagerter Schnee als am umgebenden Gelände anzutreffen, da er durch den Wind vom Gelände auf den Gletscher transportiert wird.

Die Vorgänge während und nach Schneefallperioden und die Wirkung der Topographie des Gletschers und seiner Umgebung sind sehr komplex und nicht scharf voneinander abzugrenzen. Das Ergebnis ist eine oft mehrfache Umlagerung des (trockenen) Schnees bis zu seiner endgültigen Akkumulation. Das Bild der Verteilung der Schneeablagerungen auf dem Gletscher wird von der Topographie der Gletscheroberfläche bestimmt.

Die Kenntnisse über die gesetzmäßige Verteilung der Schneedecke wurden in der Folge mehrfach bei glaziologischen Arbeiten, insbesondere bei den Massenhaushaltsuntersuchungen am Hintereisferner, herangezogen. „... die Flächen mit Altschneerücklage lassen sich deutlich gegen Bereiche abgrenzen, wo die Altschneedecke völlig abgebaut ist und die Herbsthorizonte früherer Jahre nacheinander zum Vorschein kommen. Da besonders konvexe Geländeformen geringere Schneelagen aufweisen, sind diese Gebiete nicht zufällig verteilt. Vergleiche von fotografischen Aufnahmen verschiedener Jahre zeigten eine bemerkenswerte Konstanz der Rücklagenmuster“, H. HOINKES und H. LANG [6] S. 292. Sehr erfolgreich hat H. QUECK [4] in der Rücklagenstruktur und Rücklagenverteilung am Kesselwandferner Gesetzmäßigkeiten untersucht. Aufgrund der gefundenen regelhaften Ablagerung und Verteilung des Schnees am Gletscher konnten Parameter gefunden werden, die es ermöglichen, aus nur wenigen Punktwerten gute Kenntnisse über die Gesamtverhältnisse am Gletscher zu gewinnen und sogar Beziehungen zu anderen Gletschern herzustellen. Direkt gemessene Werte der Höhenlage der Altschneelinie und rechnerisch ermittelte stimmen befriedigend überein, H. QUECK [4] S. 73.

Auch am Stubacher Sonnblickkees wurde seit Beginn der Gletscherforschungen im Jahre 1960 dem Studium dieser Gesetzmäßigkeiten besondere Aufmerksamkeit geschenkt [7]². In der Gletscherforschung wurden solche Untersuchungen bisher nur an relativ einheitlich gebauten Talgletschern und ähnlichen Gletschertypen durchgeführt. Das Sonnblickkees als Hanggletscher ist komplizierter gestaltet und weist eine uneinheitliche Topographie der Gletscheroberfläche auf. Die Kenntnis des Komplexes über die Art und Weise der Schneeablagerung und der Ausaperungsbedingungen sind hier von noch größerer, wenn nicht entscheidender Bedeutung für die Erforschung des Verhaltens des Gletschers und seiner Ernährungsbedingungen.

Die vorliegende Arbeit hat sich zur Aufgabe gestellt, den Verlauf der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees, einem kleinen Gehängegletscher und das jährliche Höherwandern der temporären Schneegrenze (= temporäre Altschnee-

² Nach dem Beginn der ersten Gletschermessungen an den Gletschern des obersten Stubachtals wurden 1963 mit Massenbilanzuntersuchungen am Stubacher Sonnblickkees begonnen, die 1965 im Rahmen des österreichischen Nationalprogrammes innerhalb der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) fortgesetzt wurden und zumindest bis Ende der Dekade im Jahre 1974 fortgeführt werden sollen [7, 8]. Die Forschungen werden vom Hydrographischen Zentralbüro und vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung über die Geophysikalische Kommission bei der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien gefördert. Für die Bereitstellung der Mittel sei auch an dieser Stelle gedankt.

linie) in ihrer Abhängigkeit von den topographischen Verhältnissen der Gletscheroberfläche darzustellen³.

2. Das Stubacher Sonnblickkees

Das Stubacher Sonnblickkees liegt im obersten Stubachtal in den mittleren Hohen Tauern⁴. Das Tal bildet die Grenze zwischen der westlich gelegenen Granatspitzgruppe und der östlich anschließenden Glocknergruppe. Das Sonnblickkees liegt im natürlichen Einzugsgebiet des östlichen Quellastes der Stubache, des Weißbaches. Durch die Anlage von Speicherkraftwerken sind die hydrographischen Verhältnisse geändert worden. Das Sonnblickkees befindet sich jetzt im Einzugsbereich des Speichers Weißsee (2250 m), er umfaßt 5,3 km², wovon 1,7 km² oder 32% vergletschert sind. Die Gletscherbäche entwässern in den Weißsee, dessen künstlicher Überlauf nun den östlichen Quellast der Stubache, den Tauernmoosbach mitspeist. Das Stubacher Sonnblickkees hat durch den starken Gletscherrückgang die noch um 1925 vorhandene Gletscherzunge verloren. Um 1850 reichte der Gletscher noch bis 2250 m herab. In den vergangenen 40 Jahren ist er um mehr als 500 m zurückgegangen [7]. Das Kees endet jetzt in einer Höhe von 2510 m. Der verbliebene Eiskörper bildet einen Hanggletscher (Gehängegletscher), dessen höchste Teile an der Granatspitz (3086 m) und am Stubacher Sonnblick (3089 m) wurzeln. Der nach Osten exponierte Hanggletscher nimmt eine Fläche von 1,6 km² (1963) ein. Seine Oberfläche ist uneinheitlich gestaltet und in steilere Hänge und flache Mulden gegliedert. Die steilsten Böschungen befinden sich im „Großen Eisbruch (Filleckbruch)“ und im Mittelteil des Gletschers im „Gehänge“ zwischen 2600 und 2800 m. Der höchstgelegene Teil des Gletschers zwischen der Granatspitz und dem Sonnblick ist der „Oberste Boden“. Der „Filleckbruch“ trennt den „Filleckboden“ vom „Unteren Boden“. Eine weitere Verflachung ist der „Granatspitzboden“. Das „Gehänge“ liegt zwischen dem „Obersten Boden“ und dem „Unteren Boden“.

Bei durchschnittlichen Ernährungsbedingungen sind der „Oberste Boden“ und der „Filleckboden“ Nährgebiet, der „Untere Boden“ und der „Granatspitzboden“ sowie einzelne Buckelzonen im „Gehänge“ Zehrgebiet. In extremen Jahren kann der Gletscher fast zur Gänze Akkumulations- oder Ablationsgebiet sein⁵.

3. Methoden zur Feststellung der Ausaperungsstände und der sommerlichen Änderung der temporären Altschneelinie

Die genaue Verfolgung der sommerlichen Änderung der temporären Schneegrenze (= temporäre Altschneelinie) beziehungsweise der Ausaperung⁶ des Geländes und des Gletschers ist ohne oftmalige Kartierung während der Feldarbeiten nicht möglich [2]. Kartierungen im Gelände können durch terrestrische oder besser luftphotogrammetrische Vermessungen ergänzt oder zum Teil sogar ersetzt werden. In der Praxis müssen Kartierungen und Vermessungen fast immer gemeinsam angewandt werden [9, 10].

³ Vergleiche die beiliegenden Karten des Stubacher Sonnblickkees 1 : 5 000 und der Ausaperungsstände 1 : 25 000. Bei der Benützung der Karten ist zu beachten, daß hier erstmals versucht wurde, auch Firn- und Eisflächen voneinander getrennt, kartographisch darzustellen.

⁴ Nicht zu verwechseln mit dem Sonnblickgletscher in der Goldberggruppe, in dessen Nähe das bekannte Sonnblickobservatorium liegt.

⁵ Die lokalen Bezeichnungen sind im Bild 1 (Tafel III) eingetragen.

⁶ Unter „Ausaperung“ versteht man im alpinen Sprachgebrauch das Schneefreiwerden des Geländes.

Luftphotogrammetrische Aufnahmen und Vermessungen sind am besten geeignet, den Zustand des Gletschers zu bestimmten Zeitpunkten festzuhalten [9]. Sie sind unentbehrliche Grundlage für die genaue Abgrenzung der Altschnee- und Firnbedeckung des Gletschers. Zugleich werden damit Grenzlinien (Altschneelinie, Firngrenze) festgelegt. Aber nicht nur qualitative, auch quantitative Aussagen sind gut möglich. Dieser Methode sind jedoch Grenzen gesetzt. Sie kann nicht in der wünschenswerten Häufigkeit eingesetzt werden, weil die Kosten zu hoch sind, außerdem aber nur an wenigen Sommertagen im Hochgebirge optimale Aufnahmebedingungen herrschen. Außerdem müssen die Gletscher zu den Aufnahmezeiten frei von Neuschnee sein. Zumindest wären aber Luftaufnahmen zur Zeit der maximalen Ausaperung, meist Ende September, angebracht und wünschenswert⁷.

Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahmen und Auswertungen können den gleichen Zweck erfüllen, sind aber nur begrenzt verwendbar, da sie nur für Spezialuntersuchungen in Frage kommen und in der Praxis kaum für eine größere Anzahl von Gletschern und auch nicht mehrmals im Jahr wiederholt werden können.

Für die Kartierungen ist eine großmaßstäbige Karte als Arbeitsgrundlage unentbehrlich. Bei Beginn von Gletscheruntersuchungen ist eine solche meist nicht vorhanden und muß erst erstellt werden. Amtliche Karten sind wegen des zu kleinen Maßstabes und der veralteten Gletscherstände nur für Vergleichszwecke zu gebrauchen. Optimal ist es schon, wenn jährlich einmal photogrammetrische Aufnahmen gemacht werden können. Sie sollen dann möglichst gegen Ende der sommerlichen Abschmelzperiode, zur Zeit der maximalen Ausaperung erfolgen. Die Auswertung sollte spätestens zu Beginn des nächsten Sommers zur Verfügung stehen. Die mit Hilfe des Autographenplanes hergestellten Grundkarten werden für die Kartierung benützt.

Bei den Begehungen des Gletschers, die so oft als möglich stattfinden, wird der Zustand der Oberfläche in die Grundkarte eingetragen. Die Zahl der Kartierungsgänge richtet sich auch nach den jeweiligen Ausaperungsverhältnissen. Es werden jeweils die Flächen mit Eis und Altschnee und gegebenenfalls auch Firn eingetragen. Die Firnschichten sind zumeist am Grad der Verschmutzung gut unterscheidbar. Auch der verschiedene Grauwert der Firnlagen auf Fotos leistet dabei gute Dienste. Mit den Flächenabgrenzungen sind zugleich die Grenzlinien (Altschneelinie, Firngrenze) festgelegt. Auf diese Weise werden Arbeitskarten, die Ausaperungsstände zu bestimmten Zeitpunkten enthalten, gewonnen. Die vollständige Kartierung einer Ausaperungsreihe während eines Sommers setzt voraus, daß die Ausaperungsstände in entsprechender Dichte vor allem immer gegen Ende von Schönwetterperioden erfaßt werden. In den letzten Wochen des Bilanzjahres ist besonders oft zu kartieren, da jederzeit Neuschneefälle die Ablationsperiode beenden können und die Ausaperungsstruktur am verschneiten Gletscher nicht mehr feststellbar ist. Unentbehrliche Hilfsmittel sind photographische Aufnahmen von höhergelegenen Standpunkten und Flugschrägaufnahmen. Sie sind oft die einzige Möglichkeit, vor einem Schlechtwettereinbruch, der im Hochgebirge meist mit Neuschneefällen verbunden ist, rasch einen Augenblickszustand des Glet-

⁷ In Österreich wurde mit der „Gesamtbefliegung der österreichischen Gletscher“ im Spätsommer und im Frühherbst 1969 ein Anfang gemacht. Sie dient nicht nur zur Bestandsaufnahme der gesamten österreichischen Gletscher und zur Feststellung der vergletscherten Fläche, sondern auch zu Studien über die Höhenlage der Altschneelinie und Firngrenze und über die Ernährungsverhältnisse der Gletscher.

schers dokumentarisch festzuhalten. Eine weitere Hilfe zur exakten Kartierung sind im Gletscher eingebohrte, vermessene Pegel. Auch tachymetrische Vermessungen können gute Dienste leisten.

Im Jahre 1963 wurden am Sonnblickkees erstmals terrestrisch-photogrammetrische Vermessungen durchgeführt [11, 12]. Vom Gletscher wurde eine Karte im Maßstab 1 : 5 000 hergestellt, die als Grundlage für eine Arbeitskarte im selben Maßstab diente. Seitdem ist der Gletscher bei Vermessungsarbeiten im Rahmen der IHD 1967, 1968, 1969 und 1970 photogrammetrisch aufgenommen worden. Von 1968 und zum Teil 1967 liegen Autographenpläne im Maßstab 1 : 5 000 vor⁸. Bei den Auswertungen wurde besonders auf die Eintragung des Verlaufes der verschiedenen Grenzlinien geachtet.

Nach Vorliegen der geeigneten Kartengrundlagen wurde auf eine möglichst vollständige Kartierung der jährlich auftretenden Ausaperungsstände geachtet. Entscheidend wichtig waren die extremen Ausaperungsstände in den Jahren 1963 und 1964 (vgl. die Kartenbeilagen). Sie gaben über jene Stellen Aufschluß, die am längsten mit Altschnee bedeckt bleiben, wie überhaupt die Feinstrukturen der Topographie der Gletscheroberfläche erst in diesen beiden Extremfällen zutage traten und festgehalten werden konnten. Da die Ausaperung seither nie mehr so stark war, blieben diese Beobachtungen die einzigen in dieser extrem (negativen) Form.

Infolge der relativ unruhigen und kuppigten Oberfläche des Sonnblickgletschers und seine Gliederung in Sammelmulden und Steilhänge ist die Struktur während des Verlaufes der Ausaperung oft sehr kompliziert. Erst nachdem man im Laufe einiger Jahre Erfahrungen gesammelt hatte, welche Stellen zuerst schneefrei werden und wo der Altschnee am längsten liegenbleibt, d. h. nachdem die konstante Lage der Aper- und Schneefiguren bekannt ist, kann man die Abgrenzung der Areale besser und rascher durchführen.

In den vergangenen Jahren sind am Sonnblickkees nach Abschmelzen der Altschneedecke ältere Firnschichten zu beobachten gewesen. Es zeigte sich ein oft verwirrendes Labyrinth von Linien und Streifen verschiedener Grauschattierung, das die Analyse schwierig gestaltete. Bei der Kartierung dieses komplizierten Linien- und Flächengefüges hat es sich als vorteilhaft erwiesen, Farbsignaturen zu verwenden und diese, ähnlich wie bei geologischen Karten mit Kennziffern zu versehen, da die einzelnen Teilflächen oft sehr klein sein können. Es ist zu empfehlen, mit der Zählung bei den liegenden Firnschichten zu beginnen, um den Auftrag der weiteren fortlaufend nummerieren zu können. Auch die Grenzlinien sollen mit verschiedenen Liniensignaturen gekennzeichnet werden.

Auf jeder Arbeitskarte muß das genaue Datum der Kartierung vermerkt werden. Manchmal ist eine Kartierung für zwei verschiedene Zeitpunkte gültig. Wenn ein Schneefall die Abschmelzung der Altschneedecke unterbricht und der folgende Schmelzprozeß des Neuschnees sehr rasch erfolgt, stimmt der Ausaperungsstand am Beginn der nächsten Schönwetterperiode mit dem Stand am Ende der vorhergehenden überein. Meistens bleibt aber der Neuschnee in höheren Lagen länger liegen und der Abbau der Altschneedecke wird hier

⁸ Die Photogrammetrie wurde von L. MAUELSHAGEN, H. SLUPETZKY und W. SLUPETZKY durchgeführt. Die Auswertungen erfolgten am Institut für Photogrammetrie in Bonn durch W. SCHRÖTER und L. MAUELSHAGEN. Die Vermessungsarbeiten standen unter der Leitung von G. SIEMES unter Mithilfe von J. BRENNER, H. KAHMEN, S. LAUER, O. SCHUSTER und T. JOHANNSEN. Auch an dieser Stelle sei allen für ihre Mitarbeit gedankt.

später fortgesetzt. In diesen Fällen ist es günstig, zumindest Teilgebiete, die sich sehr rasch ändern, in Zwischenständen zu kartieren. Zur Vervollständigung sollten auch die Tage mit Neuschneebedeckung vermerkt werden. Eine Untergliederung des Gletschers in Zonen verschieden langer Neuschneebedeckung ist vielfach notwendig.

Auch bei Fotoaufnahmen ist eine exakte Datumsangabe unerlässlich. Gleichzeitig mit der Kartierung durchgeführte *Fotodokumentationen* sollten direkt auf der Arbeitskarte festgehalten werden. Beim Photographieren des Gletschers ist darauf zu achten, daß gleichmäßige Beleuchtungsverhältnisse herrschen. Am günstigsten ist wolkenloser oder gleichmäßig bedeckter Himmel (Zirrostratus oder Altostratus), da die Graustufen der Firnschichten besser zur Geltung kommen. Unregelmäßige Wolkenschatten können die Interpretation von Fotos erschweren. Sehr zu empfehlen ist auch die Herstellung von Bildpaaren zur stereoskopischen Betrachtung, die ohne weiteres aus der Hand zu machen sind (die jeweilige Länge der Basis läßt sich unschwer ermitteln)⁹.

4. Begriffe und Definitionen — Probleme der Terminologie

Die Diskussion über die Begriffsbestimmung und Bezeichnung der Linien und Grenzen am Gletscher sowie der verschiedenen Firnarten ist so alt wie die Gletscherforschung selbst. Seit man sich mit „Keesen“ und „Fernen“ beschäftigt, sind zahlreiche Bezeichnungen verwendet worden. So gebrauchten schon die Brüder H. u. A. SCHLAGINTWEIT auf ihrer „Karte des Pasterzengletschers nach Beobachtungen im Jahre 1846 und 1848“ den Ausdruck „Firnlinie“ zur Abgrenzung der blanken Gletscherzunge vom „Firnmeer“ [13]. Oft wurden Firnlinie und Firngrenze synonym verwendet, E. DRYGALSKI und F. MACHATSCHEK [14] S. 9. Es ist bei der Bestimmung und Bezeichnung der Grenzlinien am Gletscher wiederholt zu Fehlern gekommen. Die Ursache liegt einerseits darin, daß bei der „Firnlinie“ im alten geographischen Sinn nicht zwischen verschieden altem Firn, zwischen dem „Schnee“ aus dem laufenden Haushaltsjahr (Altschnee) und dem „Firn“ früherer Haushaltsjahre, d. h. einjährigen und mehrjährigen Ablagerungen unterschieden wurde. Als „Firnlinie“ wurde meistens die am Gletscher momentan sichtbare Grenze zwischen Eis und Firn angesehen. Je nach den besonderen Verhältnissen im laufenden Haushaltsjahr kann aber einmal die diesjährige Akkumulation, ein anderes Mal eine ältere Firnschichte die Grenze bilden. Andererseits haben auch methodische Fehler zu Verwirrungen geführt: Bei der Bestimmung der „Schneegrenze“ wurden — verständlicherweise — immer wieder Gletscher als Indikatoren für die klimatischen Gegebenheiten und Veränderungen herangezogen. Ohne genaue Kenntnis der in der Natur ablaufenden und am Gletscher beobachtbaren Änderungen und Vorgänge und ohne eingehendes Wissen über die komplexen Beziehungen zwischen den klimatischen Änderungen und den Gletscherschwankungen ist jedoch die Brücke von den direkten langjährigen Beobachtungen zu den theoretischen Definitionen nicht zu schlagen.

Erst durch die in den letzten Jahren und Jahrzehnten durchgeführten Massenbilanzuntersuchungen an Gletschern sind Bemühungen um die Vereinheitlichung der Termini und eine exakte Begriffsbestimmung ausgelöst und

⁹ Die Verwendung von Polaroidkameras, bei denen man sofort das entwickelte Foto erhält und Eintragungen machen kann, hat G. PATZELT erstmals im Zusammenhang mit Gletscherkartierungen vorgeschlagen.

besonders zu dem Problemkreis der Grenzlinien am Gletscher neue Wege aufgezeigt worden.

Um die Begriffe und Definitionen klar und verständlich zu machen, sollen die Prozesse, die auf einem Gletscher räumlich und zeitlich ablaufen, an einem Talgletscher beschrieben werden. Das Ausapern der Gletscherzunge und das Höherwandern der temporären Schneegrenze (= temporäre Altschneelinie) geht bei diesem Gletschertyp relativ regelmäßig vor sich.

Stellen wir uns als Modell einen idealen Talgletscher mit einem großen, muldenartig geformten Nährgebiet und einer regelmäßig gestalteten Zunge vor (Abbildung 1). Ende September, anfangs Oktober beendet der erste größere Schneefall, der den gesamten Gletscher zudeckt, die sommerliche Ablationsperiode. Während der Wintermonate wird Schnee akkumuliert. Im Frühjahr wird die maximale Schneehöhe erreicht, die mehrere Meter beträgt (Abbildung 1 a). Die nun einsetzende Schneeschmelze baut die Schneedecke ab. Der Schmelzprozeß beginnt in den tiefer gelegenen Teilen des Gletschers früher und geht rascher vor sich als in den höheren. An der Gletscherstirne wird zum Beispiel im Juni das erste Mal wieder Blankeis sichtbar (Abbildung 1 b). Im Laufe des Sommers wandert die Grenze zwischen dem Blankeis (Firn) und dem Schnee, die temporäre Altschneelinie, immer höher, bis sie gegen Ende des Sommers schon annähernd die höchste Lage erreicht (Abbildung 1 c). Im Durchschnitt mehrerer Jahre setzt der erste ergiebige Schneefall, der den gesamten Gletscher zudeckt und die Ablationsperiode und damit das Haushaltsjahr beendet, um den 30. September ein (Abbildung 1 d). Die maximale Höhenlage der temporären Altschneelinie in einem Bilanzjahr wird *Altschneelinie* genannt. Diese Linie ist von fundamentaler Wichtigkeit für die Beurteilung der Ernährungsverhältnisse des Gletschers. Bei temperierten Gletschern wie den Alpengletschern ist die Altschneelinie nahezu ident mit der Gleichgewichtslinie. Auftrag und Abtrag halten sich hier die Waage. Mißt man nun am Ende des Bilanzjahres am Gletscher die Menge, die vom ehemaligen Winterschnee im Nährgebiet zurückgeblieben ist, und jene, die durch Ablation an der Zunge verloren gegangen ist, erhält man aus der algebraischen Summe von Nettoakkumulation und Nettoablation die Massenbilanz des Gletschers.

Es ist verständlich, daß besonders auf die Beobachtung des räumlichen und zeitlichen Verlaufes und der Höhenlage der Altschneelinie geachtet werden muß, was gleichbedeutend mit der Verfolgung der Ausapernung des Gletschers ist. Frühere Forschungen haben die Wichtigkeit dieser Grenzlinie empirisch erkannt, die neuen Untersuchungen haben dies bestätigt und darüber hinaus weitere Erkenntnisse gebracht.

Die Altschneelinie bleibt bei ungünstiger Witterung während des Haushaltsjahres am Ende der Abschmelzperiode in tiefer Lage. Ältere Firnschichten bleiben verdeckt und unterhalb der Altschneelinie findet nur Eisablation statt (Abbildung 2). In negativen Haushaltsjahren wandert die Altschneelinie oft hoch hinauf und ältere Firnlagen werden freigelegt. Die Altschneelinie verläuft dann mitten durch die Firnfläche. Unterhalb der Altschneelinie findet Firn- und Eisablation statt. Das Ablationsgebiet setzt sich aus Eis- und Firnflächen und nicht wie im ersten Fall nur aus Eisflächen zusammen. Die Grenze zwischen dem blanken Eis und den Firnschichten wird *Firngrenze* genannt. Es ist die Nulllinie der Eisablation (Abbildung 3). Zwischen der Firngrenze und der Altschneelinie können auch Grenzen älterer Firnschichten sichtbar werden. Es ist dies weitgehend mit geologischen Verhältnissen zu vergleichen: Die Firn-

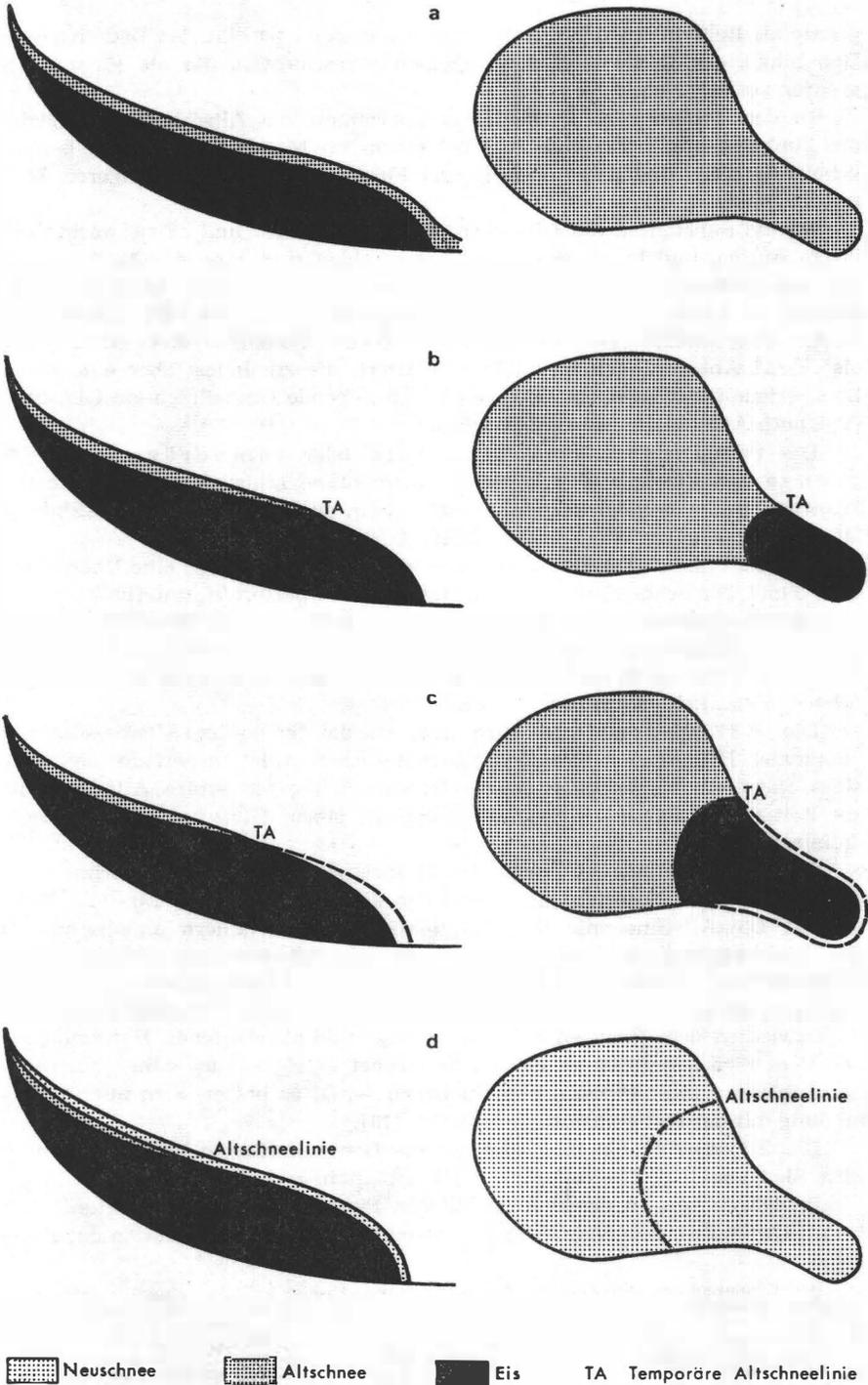


Abbildung 1
Schematische Darstellung der Ausaperung eines Talgletschers während eines Jahres
(nähere Erklärungen im Text)

grenze als Begrenzung der Firnbedeckung insgesamt ist eine Art Deckengrenze. Der Inhalt der Decke sind die einzelnen Firnschichten, die als Firnschichtgrenzen austreichen.

In den Jahren ohne Firnablation übernimmt die Altschneelinie zugleich die Funktion der Firngrenze. Nur bei einem im Massengleichgewicht befindlichen Gletscher sind Altschneelinie und Firngrenze über einen längeren Zeitraum ident.

Da die Substanzen am Gletscher, nämlich „Schnee“ und „Firn“ nicht nach ihrem Aufbau und Inhalt genau zu unterscheiden sind, muß das Merkmal der Zeit als Prämisse vorangestellt werden, um die Grenzlinien begrifflich klar trennen zu können. Bezeichnet man als Altschnee den „Schnee“, der aus der winterlichen Akkumulationsperiode des laufenden Haushaltsjahres stammt und als „Firn“ Ablagerungen mehrjährigen Alters, die zumindest aber eine Ablationsperiode überdauert haben, ergeben sich folgende Grenzlinien am Gletscher. (Vgl. auch Abbildungen 1 und 2 und Bild 2 auf Tafel I)¹⁰:

Die temporäre Altschneelinie oder temporäre Schneegrenze (transient snow line) ist die momentane Linie, die eine Fläche mit Schnee aus dem laufenden Haushaltsjahr (bzw. aus der winterlichen Akkumulationsperiode) gegen eine schneefreie abgrenzt.

Es ist oft der Fall, daß diese Grenze besonders im Gelände eine Übergangszone bildet. Die Schneedecke ist mehr oder weniger perforiert, unterhalb schließt eine Schneefleckenzone an. Die Grenze wird dort gezogen, wo mehr als 50% der Fläche schneebedeckt sind. Die Bestimmung dieser Grenze und auch der unteren Grenze der Schneefleckenzone (line of snow patches) = orographische Schneegrenze, richtet sich nach der Fragestellung.

Die Altschneelinie (firn line) ist die temporäre Altschneelinie in maximaler Höhenlage während der sommerlichen Ablationsperiode (am Ende eines Haushaltsjahres), oder anders formuliert, die temporäre Altschneelinie zur Zeit der minimalen Schneebedeckung auf einem Gletscher oder in einem definierten Gebiet.

Die Altschneelinie ist damit die Grenze zwischen dem (Alt)Schnee des gerade beendeten Haushaltsjahres und den Eis-, gegebenenfalls Eis- und Firnflächen. Die Altschneelinie fällt bei temperierten Gletschern annähernd mit der Gleichgewichtslinie zusammen (s. u.). Die Altschneelinie wurde früher „Firnlínie“ oder auch „Firngrenze“ genannt, da diese aber bei einer gegenüber dem Vorjahr negativeren Bilanz, bzw. stärkeren Ausaperung nur die Grenzlinie zwischen dem jüngsten Firn aus dem gerade abgelassenen Haushaltsjahr und dem Firn aus früheren Jahren bezeichnet — sie kommt daher innerhalb des Gebietes älterer Firnschichten zu liegen —, ist es besser, Firn nur in Verbindung mit der Firngrenze zu verwenden [18].

Die Firngrenze (firn edge) ist die Grenze zwischen blankem Eis und Firn. Sie ist zugleich die Null-Linie der Eisablation.

In den Jahren, in denen keine älteren Firnschichten durch Abschmelzung freigelegt werden, übernimmt die Altschneelinie zugleich die Funktion der Firn-

¹⁰ Jahrelange internationale Fachdiskussionen scheinen zu einem vorläufigen Abschluß gekommen zu sein. Zumindest liegen seit kurzem einheitliche Richtlinien vor, die eine geeignete gemeinsame Basis bilden: Insbesondere zwischen dem deutschen und englischen Sprachraum ergeben sich größere Unterschiede zum bisherigen Sprachgebrauch. Die Übernahme englischer Begriffe führt unvermeidlich zu Umdenkprozessen. Im Interesse einer Vereinheitlichung ist es angebracht, die vorgeschlagenen Termini weitgehend zu verwenden. — Bei den Ausführungen konnte auf verschiedene Arbeiten zurückgegriffen werden [15, 16, 17], besonders H. HOINKES [18].

grenze. Die Firngrenze ist am Gletscher oft deutlicher sichtbar als die Altschneelinie. Ungenaue Beobachtungen können daher zu größeren Fehlschlüssen führen. Dies ist auch mit ein Grund — neben der Unkenntnis des Zusammenhanges zwischen der Massenbilanz und der Altschneelinie (= Gleichgewichtslinie) —, daß Höhenangaben der „Schneegrenzen“ von Gletschern mittlerer Breiten vielfach fehlerhaft oder sogar unbrauchbar sind. In negativen Jahren, in denen zahlreiche ältere Firnschichten freigelegt werden, kann aber auch die Grenze zwischen Firn und Eis sehr undeutlich sein. Diese Zone spiegelt den Übergang von Firn in Eissubstanz wieder (siehe Bild 2 auf Tafel I).

Die Gleichgewichtslinie (equilibrium line) ist die Null-Linie des Massenhaushaltes, an der sich Auftrag und Abtrag (Akkumulation und Ablation) die Waage halten.

Ihre exakte Lage ist nur durch Massenbilanzstudien zu bestimmen. Auf temperierten Gletschern, d. s. im allg. jene in mittlerer geogr. Breite, ist die Altschneelinie praktisch ident mit der Gleichgewichtslinie. Eine — zumindest definitionsgemäße — Unterscheidung beider Linien ist deshalb notwendig, da sogenanntes „Aufeis“ (superimposed ice) auftritt. Aufeis bildet sich durch Wiedergefrieren von versickertem Schmelzwasser aus der winterlichen Schneedecke auf der noch unterkühlten Eisoberfläche [19]. Das maximal 10—20 cm dicke Aufeis wird vor allem im Frühjahr gebildet, kann aber auch schon witterungsbedingt teilweise im Herbst entstehen. Das Aufeis ist als schmaler Saum unterhalb der Altschneelinie anzutreffen. In negativen Jahren zeigen sich oft komplizierte Verhältnisse (Bild 2, Tafel I). Das Aufeis ist neben dem Altschnee ein echter Massenzuwachs, besonders für die Ernährung der Gletscher in höherer geographischen Breiten ist es von großer, oft ausschlaggebender Bedeutung.

Die Gleichgewichtslinie ist für den Massenhaushalt eines Gletschers fundamental wichtig. Sie trennt das Akkumulationsgebiet vom Ablationsgebiet. Da sie auf temperierten Gletschern praktisch ident mit der Altschneelinie ist, kommen der Altschneelinie die zuletzt angeführten Eigenschaften und Bedeutungen im Zusammenhang mit den Ernährungsbedingungen des Gletschers zu. Am Stubacher Sonnblickkees wurde daher die Altschneelinie bei der Erforschung der Ausaperungsprozesse herangezogen¹¹.

5. Der Verlauf der Ausaperung und die Ausaperungsstadien am Stubacher Sonnblickkees

Beim Stubacher Sonnblickkees geht die Ausaperung nicht so regelmäßig vor sich wie bei vielen Talgletschern (Abbildung 1). Die Problematik ergibt sich im großen und ganzen aus folgendem: Erstens umfaßt der Gletscher nur rund 500 Höhenmeter und zweitens ist seine Oberfläche unruhig gestaltet.

¹¹ Für den Gebrauch der beliegenden Karten wird auf folgendes aufmerksam gemacht: Die Bezeichnung „Altschneelinie“ wurde im Sinne von H. HOINKES und H. LANG [6] verwendet. Bei der Bezeichnung „Firnlinie“ wurde auf einen Terminus zurückgegriffen, der auch gebräuchlich ist und beispielsweise von R. v. KLEBELSBERG [20] verwendet wurde. Im Interesse einer Vereinheitlichung sollen aber jene Bezeichnungen verwendet werden, wie sie — nach Erscheinen der Karten — zum internationalen Gebrauch vorgeschlagen wurden [15, 16, 17, 18]. Auf der Karte des Stubacher Sonnblickkees 1:5 000 entspricht die „Firnlinie“ nunmehr der Firngrenze. Die „Nebenfirnlinie“ müßte, wenn man den Ausdruck beibehalten will, konsequenterweise „Nebenfirngrenze“ heißen; besser aber ist es, man spricht nunmehr z. B. von der „Grenze des Firns 1958/59“ oder „Grenze des 1958er Firns“. Auf der Karte der Ausaperungsstände in den Jahren 1963—1966 ist ebenfalls statt „Firnlinie“ Firngrenze zu gebrauchen. Bei den Zwischenständen der Ausaperung auf dieser Kartentafel ist „temporär“ vorzusetzen, z. B. beim Stand der Ausaperung vom 18. Juli „Temporäre Altschneelinie“ und „Temporäre Firngrenze“. Bei den maximalen Ausaperungsständen bleibt „Temporär“ weg, da das Haushaltsjahr beendet ist und hier nach den neuen Definitionen „Altschnee“ und „Firngrenze“ verwendet wird.

Der erste Faktor bringt es mit sich, daß der Gletscher in extremen Jahren zur Gänze Nährgebiet oder zur Gänze Zehrgebiet sein kann. Die jährlichen Schwankungen der Schneegrenze umfassen einen größeren Höhenbereich als ihn der Gletscher einnimmt. Das Kees ist nur Akkumulationsgebiet, wenn die Altschneelinie unterhalb des Gletscherendes (unter 2 500 m) zu liegen kommt. Dieser Fall trat im Jahre 1965 ein. Demgegenüber kann der Gletscher auch nur Ablationsgebiet sein, wenn die Altschneelinie über 3 000 m liegt. Dieser Stand der Ausaperung wurde z. B. 1963 erreicht. Zwischen den beiden Extremen liegen eine Mehrzahl von Fällen mit sehr unterschiedlicher Ausaperung des Gletschers. Bei diesen Ausaperungsständen ist keine, auch nicht annähernd isohypsenparallele Lage der Altschneelinie festzustellen. Die Ursache liegt in der abweichenden Gestaltung der Gletscheroberfläche begründet. Das Kees weist, wie erwähnt, keine einfachen und einheitlichen Oberflächenformen und Geländeböschungen auf, sondern ist zufolge der unruhigen Topographie in einzelne Sammelmulden und Steilstellen gegliedert. Die Hangteile weisen wiederum Buckelzonen und weniger steile Böschungen auf. Trotz der generellen Ostexposition des Gletschers sind die einzelnen konkaven und konvexen Relieftteile mehr oder weniger vom Ostsektor abweichend exponiert.

Die Oberflächentopographie entspricht dem Typ eines Hanggletschers. Die meiste Ablation findet an den Steilstellen und Buckeln, die geringste in den Muldenzonen statt. Letztere sind auch die Gebiete mit größter Akkumulation.

Am Sonnblickkees ist während der sommerlichen Ablationsperiode kein einfaches Höherwandern der temporären Schneegrenze, sondern ein komplizierteres Ausapern zu beobachten. Akkumulations- und Ablationsflächen greifen ineinander. Größere und kleinere Altschneefelder liegen unregelmäßig über den Gletscher verteilt und stehen im Kontrast zu den Blankeisflächen unterschiedlicher Ausdehnung. Die Oberflächenstruktur ist vom jeweiligen Stand der Ausaperung bzw. von der Art und dem Ausmaß der Abschmelzvorgänge abhängig. Je mehr die Schneedecke abschmilzt, umso mehr löst sich das (anfänglich geschlossene) Nährgebiet in Teilflächen auf.

Da die Altschneelinie auch nicht annähernd als regelmäßige Grenzlinie zwischen dem Nährgebiet und Zehrgebiet verläuft, ist eine rasche und exakte Angabe der jeweiligen Höhe der (temporären) Altschneelinie schwierig.

Die Ausaperung des Stubacher Sonnblickkees wird seit 10 Jahren beobachtet und kartiert. Die Schwankungen waren in den einzelnen Jahren so groß, daß sich kaum ein maximaler Stand der Ausaperung mit dem anderen genau deckte. Auf der „Karte der Ausaperungsstände des Stubacher Sonnblickkees in den Jahren 1963—1966“ (vgl. die Kartenbeilage) sind vier maximale Ausaperungsstände dargestellt. Besonders auffallend sind die beiden Extreme in den Jahren 1963 und 1965.

Die Art der Ausaperung des Sonnblickgletschers hat sich als nicht zufällig erwiesen, obwohl sie das integrierte Ergebnis einer komplexen Wirkung mehrerer Komponenten ist. Bestimmte, jährlich wiederkehrende Gesetzmäßigkeiten sind in der Verteilung der Schneedecke zu beobachten. Der Verlauf der Altschneelinie paßt sich bestimmten charakteristischen Formen des Gletschers an. In Jahren mit sehr ähnlichem Witterungscharakter hat sich die Art der Ausaperung als kongruent erwiesen. Das Bild der Verteilung der Aperzonen, Schnee- und Firnflecke wird dominierend von der Topographie der Gletscheroberfläche bestimmt.

Da die Ausaperungsverhältnisse am Sonnblickkees (zunächst) kompliziert erscheinen, soll wieder der Ablauf des Abschmelzungsprozesses der Schneedecke während eines Jahres beschrieben werden.

Reiht man die Ausaperungsstände, wie sie auf der Kartenbeilage dargestellt sind, nicht nach dem Datum, sondern nach dem Fortschreiten der Ausaperung von Altschnee (der ältere Firn bleibt hier unberücksichtigt), erhält man eine Abfolge von Ausaperungsstadien (Abbildung 4), H. SLUPETZKY [7]. Je nach der Witterung durchläuft der Gletscher in einem Jahr ganz oder nur teilweise die Stadien. Eine komplette Reihe konnte in der kurzen Periode von 1963 bis 1966 nicht beobachtet und kartiert werden. Es fehlen einzelne Stadien. Als glücklicher Umstand ist es zu bezeichnen, daß innerhalb dieses Zeitraumes die beiden Extreme eingetreten sind. 1963 wäre die komplette Abfolge der Stadien zu kartieren gewesen, es mangelte jedoch an geeigneten Kartengrundlagen.

Es ergibt sich eine folgende Reihung der Ausaperungsstände nach Stadien¹²:

25. 8. 1965 = Stadium 10	28. 7. 1964 = Stadium 5
17. 10. 1966 = Stadium 9	16. 9. 1964 = Stadium 2
18. 7. 1964 = Stadium 8	23. 9. 1963 = Stadium 0

Im Ausaperungsablauf während eines Jahres werden zunächst die steilsten und exponiertesten konvexen Zonen wie der Filleck-Eisbruch und der Buckel des kleinen Eisbruch schneefrei (vergleiche Abbildung 4 und Bild 1 auf Tafel I) (Stadium 10). Es folgen die Untere Kante an der Gletscherstirn, die Obere Kante und der Ablatiobuckel, sowie einzelne Buckel im Gehänge (Stadium 9). Von den Buckeln ausgehend greift die Ausaperung immer weiter um sich und der Ausaperungsprozeß geht umso rascher vor sich, je stärker die Schneedecke perforiert wird. Dies hängt in starkem Maß von der Albedo der Firnschichten ab. In dem Moment, wo unterlagernde ältere, stark verschmutzte Firnflächen oder sogar Eis freigelegt wird, ändert sich das Reflexionsvermögen¹³.

In weiterer Folge schließen sich die Buckel zu größeren schneefreien Zonen, wie am Unteren Boden, am Granatspitzboden und im Gehänge zusammen (Stadium 8). Haben bisher die schneebedeckten Zonen gegenüber den aperen Bereichen überwogen, so tritt nun eine Umkehr ein. Der Gletscher, der bisher „weiß“ erschien, wirkt nun schmutziggrau. Die Umkehr ist in tieferen Lagen wieder früher zu beobachten als im obersten Firnggebiet, soweit dies bei einer Höhererstreckung des Gletschers von nur 500 Meter überhaupt möglich ist. Vielmehr ist dies von den topographischen Faktoren abhängig. Die Schneedecke zieht sich nun unter weiterer Auflösung in geschützte Muldenlagen zurück (Stadium 5), bis nur mehr Reste des Altschnees zurückbleiben (Stadium 2), im Extremfall auch in die höchsten Teile des „Nährgebietes“ (Stadium 0), am Obersten Boden.

Die Kartierungen am Stubacher Sonnblickkees zeigen, daß die Art der Ausaperung gesetzmäßig vor sich geht und von der Topographie

¹² Die Bezeichnung der Stadien sind Kennziffern, die sich aus dem bei Massenbilanzstudien häufig berechneten Flächenverhältnis von Akkumulationsgebiet zu Gesamtfläche des Gletschers (accumulation area ratio = AAR) M. F. MEIER [16] ergeben.

¹³ Wenn das vorhergehende Jahr stark negativ war (z. B. 1963 und 1964), kommt im Folgejahr sofort das blanke Eis mit einer sehr niedrigen Albedo (0,1 bis 0,5) an die Oberfläche, war es stark oder extrem positiv (wie 1965), wird im nächsten Jahr nach dem Abbau der Altschneedecke (0,55 bis 0,75) Firn mit einer höheren Albedo (0,35 bis 0,56) als Eis freigelegt und der Abschmelzprozeß verläuft langsamer, HOINKES [21] S. 415; [17] S. —, H. SLUPETZKY [7] S. 117 ff. Dies hat einen nicht unbedeutenden Einfluß auf die Massenbilanz [17].

der Gletscheroberfläche abhängt. Die Geschwindigkeit der Ausaperung im Laufe eines Jahres und das Erreichen eines bestimmten Stadiums hängt von den Witterungsverhältnissen ab.

Die Topographie der Gletscheroberfläche wirkt sich entscheidend auf die Art und Weise des Abschmelzens der Altschneedecke aus. Es zeigte sich, daß die Verteilung der Rücklagenmuster und Aperfiguren und die Art der Ausaperung in den verschiedenen Jahren gut übereinstimmt, ihre Lage zueinander weitgehend konstant bleibt und nur ihre Ausdehnung je nach dem Witterungsablauf wechselt. Konvexe Zonen (Buckelzonen) sind in den Jahren mit starker Abschmelzung die Gebiete mit größter Ablation. Relativ bleiben diese Verhältnisse auch in den Jahren mit geringer Abschmelzung gleich. In Buckelzonen bleibt weniger Schnee liegen als in Muldenzonen¹⁴. Buckel- und Muldenzonen decken sich von einem Jahr zum anderen. Sogar kleine Details der Aperfiguren und Rücklagenmuster stimmen überein (Bild 3 und 4 auf Tafel II). Die Topographie der Gletscheroberfläche ist durch das Relief im Gletscheruntergrund vorgegeben. Die Konstanz des Reliefs bewirkt eine relative Konstanz der Gletschertopographie. Durch die Topographie ist ein bestimmtes Verteilungsmuster der Schneedecke gegeben und die Ausaperung geht gesetzmäßig — wenn auch nicht im streng physikalischen Sinn — vor sich.

Auch bei geänderten Ernährungsbedingungen und wandelnder Eisdicke und Eisbewegung bleiben diese Verhältnisse in großen Zügen erhalten. Dies konnte durch einen Vergleich von alten Fotos mit heutigen bewiesen werden. Ein Foto des Sonnblickgletschers vom September 1929 und eines vom 6. September 1964 zeigt den Gletscher in beiden Jahren extrem ausgeapert. Die Buckel- und Muldenzonen stimmen darauf weitgehend überein. Auch der Vergleich eines Fotos von 1968 (Bild 5, Tafel III) mit einem aus der Zeit um 1940 (Bild 6, Tafel III) bestätigt dies. Die aperen Zonen im Filleckbruch, an der Unteren und Oberen Kante und im Kleinen Eisbruch sind in beiden Bildern anzutreffen. Auch der „Ablatiobuckel“ und Eisbuckel im Gehänge stimmen lagemäßig überein. Die Konstanz ist also auch bei verschiedenen Gletscherständen noch vorhanden. Am Unteren Boden hat der Gletscher in den rund 30 Jahren ca. 40—50 m Eisdicke eingebüßt. Das Relief des Untergrundes wirkt sich auch bei geänderten Ernährungsverhältnissen aus, und erst bei größeren Gletscherschwankungen treten Abweichungen auf. Bei Hanggletschern, wie dem Sonnblickkees, wird sich das Relief des Untergrundes aber immer auswirken und an der Gletscheroberfläche in einer Konstanz höherer Ordnung in Erscheinung treten. Derzeit machen sich die Reliefverhältnisse des Gletscherbettes wegen der geringen Eismächtigkeit besonders stark bemerkbar¹⁵. Nur eine starke Zunahme der Eisdicke könnte die bestehenden Zustände ändern. Bei Gehängegletscher ist dies nur bis zu einem gewissen Grad möglich, da das potentielle Nährgebiet — abgesehen von Änderungen größerer Dimension — große Eismächtigkeiten nicht zuläßt.

¹⁴ Vgl. die Ergebnisse der Massenbilanzuntersuchungen am Stubacher Sonnblickkees [7].

¹⁵ Der Verfasser schätzt die mittlere Eismächtigkeit des Sonnblickkees auf ca. 30 m, H. SLUPETZKY [7], S. 90. Genaue Dickenmessungen konnten bisher nicht durchgeführt werden. Besonders seismische Vermessungen könnten über das Relief des Gletscherbettes Aufschluß geben. Damit käme der hier angeschnittene Fragenkomplex besser in den Griff.

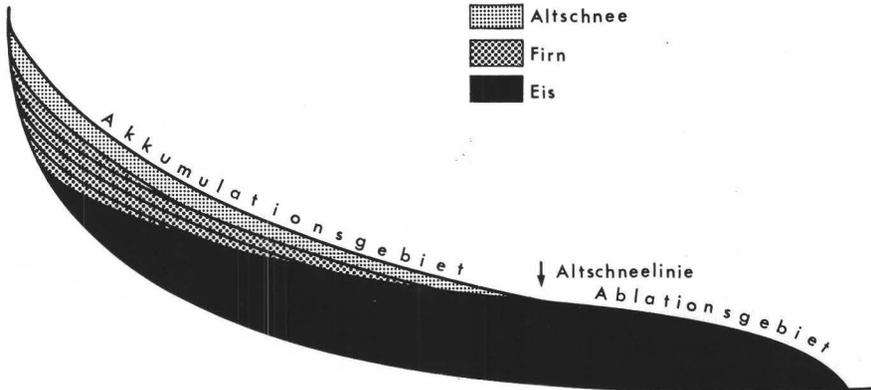


Abbildung 2:
Schematischer Querschnitt durch einen Gletscher (Variante 1). Die Altschneelinie trennt das Nährgebiet vom Zehrgebiet. Ältere Firnschichten bleiben unter dem Altschnee verborgen.

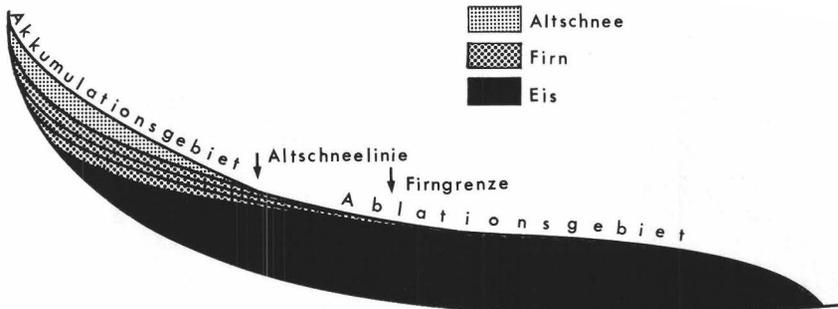


Abbildung 3:
Schematischer Querschnitt durch einen Gletscher (Variante 2). Bei höherer Lage der Altschneelinie können ältere Firnschichten aufgedeckt werden. Die Grenze zwischen den Firnlagen und dem blanken Eis ist die Firngrenze.

TAFEL II

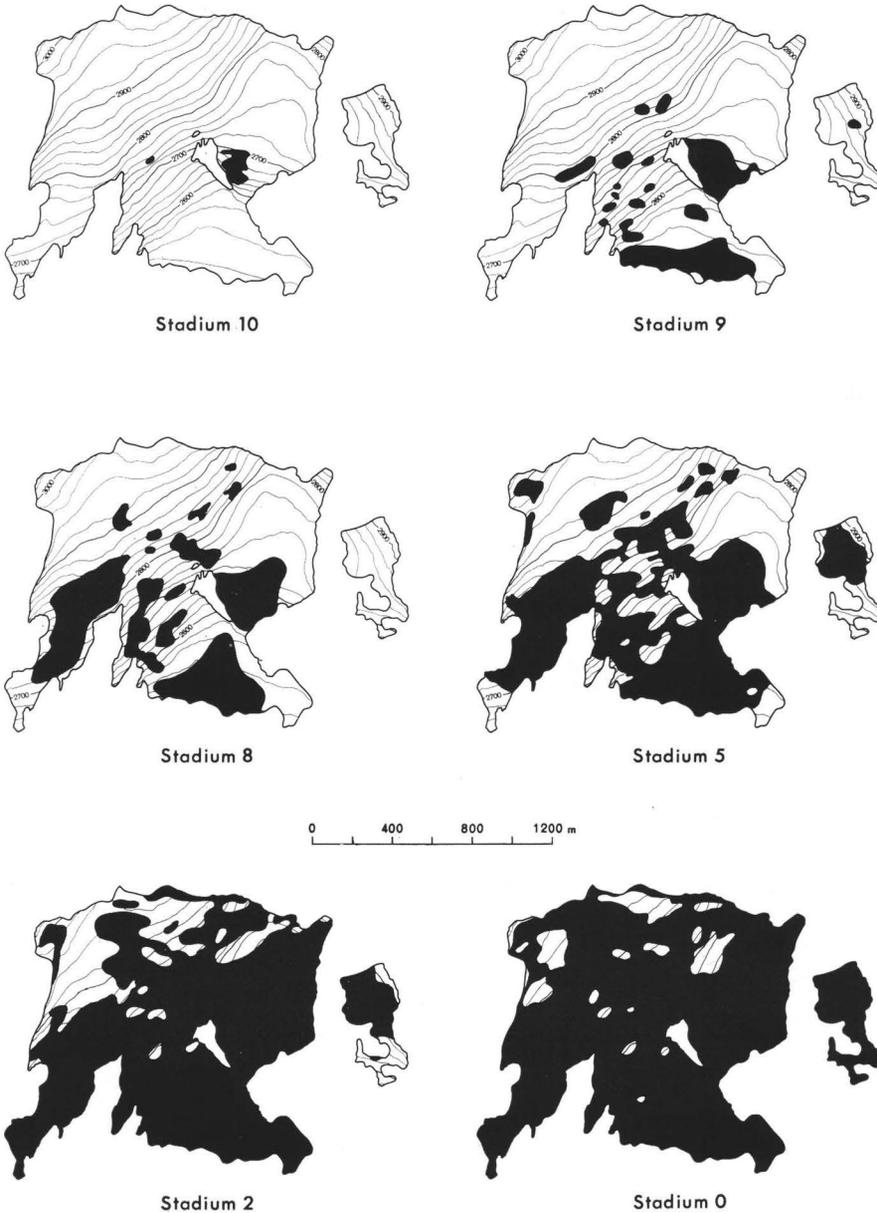
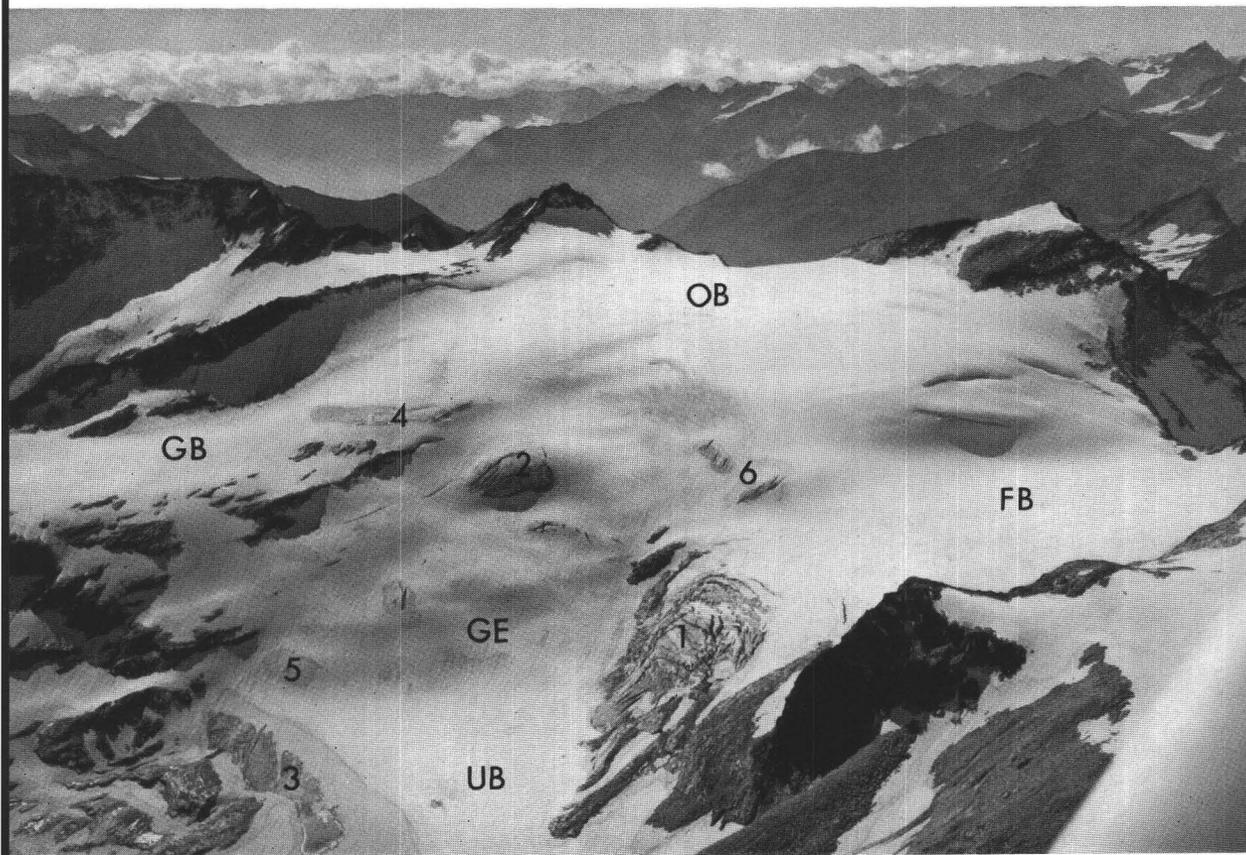


Abbildung 4:
 Die Ausaperungsstadien am Stubacher Sonnblickkees. Weiß = Nährgebiet, Schwarz = Zehrgebiet. Reiht man die Ausaperungsstände, wie sie auf der Kartenbeilage dargestellt sind, nicht nach dem Datum, sondern nach dem Fortschreiten der Ausaperung des Altschnees, erhält man eine Abfolge von Stadien. Je nach Witterung in den einzelnen Jahren durchläuft der Gletscher ganz oder nur teilweise die Stadien. Die Bezeichnung der Stadien sind gleichzeitig Kennziffern, die sich aus dem Flächenverhältnis Akkumulationsgebiet zur Gesamtgletscherfläche ergeben.



Aufnahme H. Slupetzky, 5. Oktober 1966

Bild 1:

Das Stubacher Sonnblickkees in den Hohen Tauern am 5. Oktober 1966. Der Gletscher beginnt am Fuße der Granatspitze, 3086 m (links) und des Stubacher Sonnblick, 3089 m (rechts). Das Foto zeigt annähernd den maximalen Stand der Ausaperung der am 17. Oktober 1966 (vgl. Kartenbeilage) erreicht wurde. Der Gletscher ist größtenteils mit Altschnee bedeckt. Nur einzelne Buckel sind ausgeapert. Stellenweise ist der unterlagernde, schmutzige Firn aus den vorhergehenden Jahren aufgedeckt, besonders zwischen der „Unteren Kante“ (3) und dem „Unteren Boden“ (UB). UB Unterer Boden, FB Filleckboden, OB Oberster Boden, GB Granatspitzboden, GE Gehänge, 1 Filleck-Eisbruch (großer Eisbruch), 2 Kleiner Eisbruch, 3 Untere Kante, 4 Obere Kante, 5 Achter, 6 Ablatio-Buckel.



Aufnahme H. Slupetzky, 3. August 1970

Bild 2:

Das Firngebiet des Björlingglaciär in Schwedisch Lappland am 3. August 1970. Der Björlingglaciär ist ein nach SE exponierter Kargletscher. Er beginnt an der Südostflanke des Kebnekaise (2117 m) in einer Höhe von 1790 m und endet in 1430 m (vgl. Topogr. Karte von Schweden 1:50 000 Bl. Kebnekaise). Im Haushaltsjahr 1969/70 wanderte die temporäre Altschneelinie (= temp. Schneegrenze) sehr hoch hinauf. Zahlreiche ältere Firnschichten wurden der Abschmelzung ausgesetzt. Auch der steile Rand des Firngebietes wurde aper. Die Linie zwischen dem hellen Altschnee und dem dunklen schmutzigen Firn ist die temporäre Altschneelinie (AL = durchgezogene Linie). Die Grenze zwischen dem blanken Eis und der Firnbedeckung bildet die Firngrenze (FG = strichliert). Dazwischen sind Grenzen älterer Firnschichten und ausstreichende Eislagen, z. T. Aufeis sichtbar.

Zu nebenstehenden Bildern 3 und 4:

Der Stand der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees am 12. August 1969 (rechts oben) und am 26. September 1970 (rechts unten). Der Bildvergleich zeigt die Konstanz der Aperfiguren und Altschneefelder in gesetzmäßiger Abhängigkeit von der Topographie der Gletscheroberfläche.

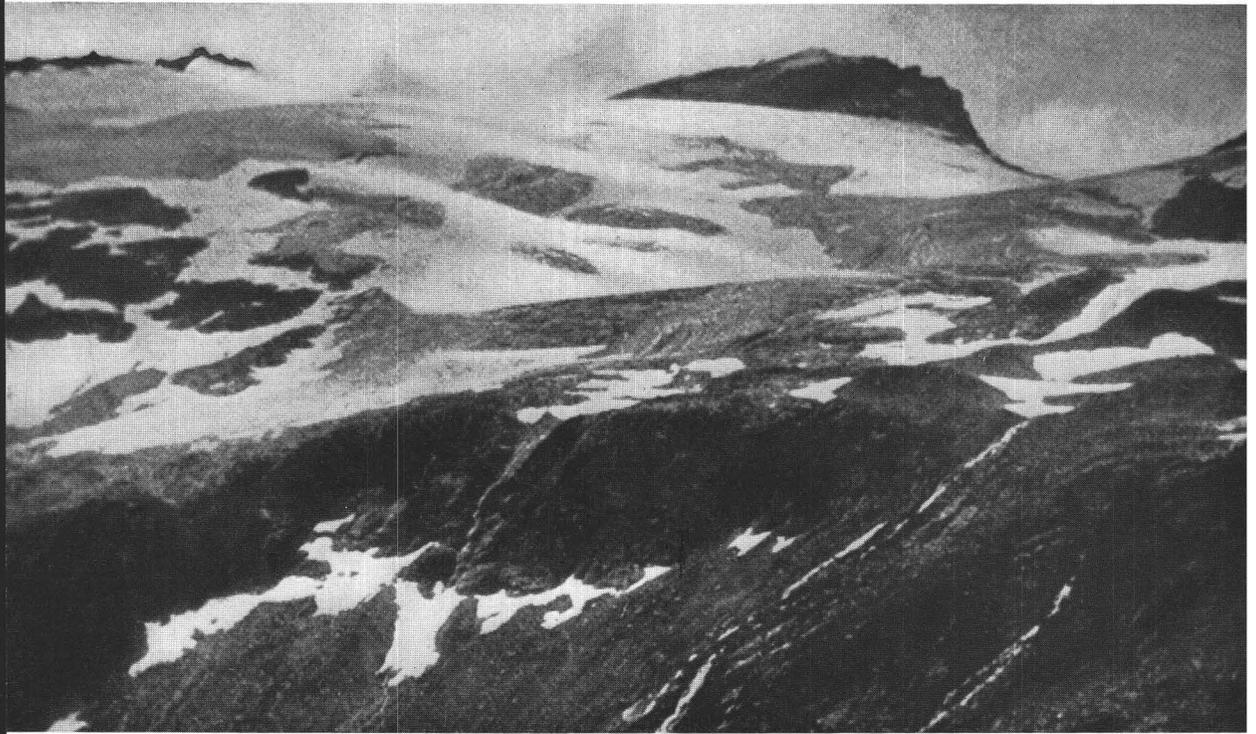


Bild 3

Aufnahme H. Slupetzky, 12. August 1969



Bild 4

Aufnahme H. Slupetzky, 26. September 1970



Bild 5

Aufnahme H. Slupetzky, 30. August 1968



Bild 6

Aufnahme G. Roßmanith, 1940

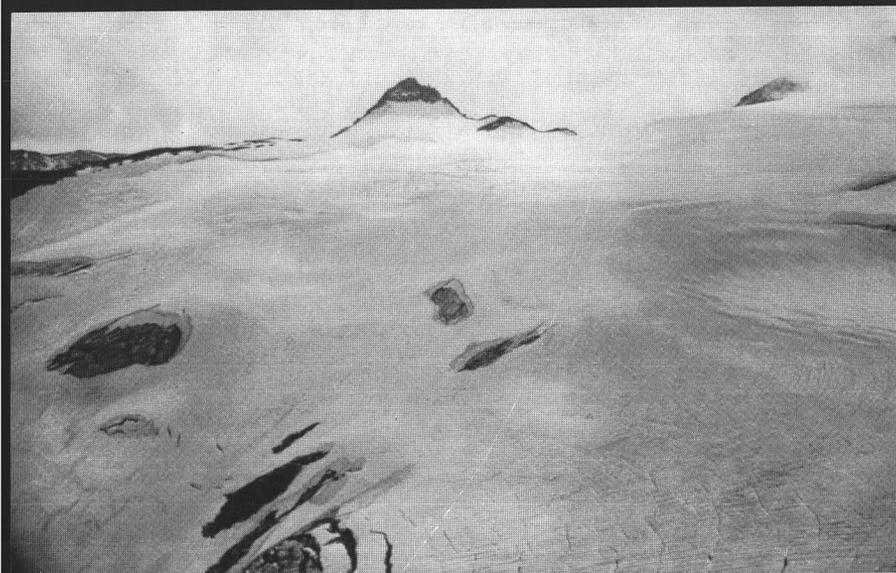


Bild 7

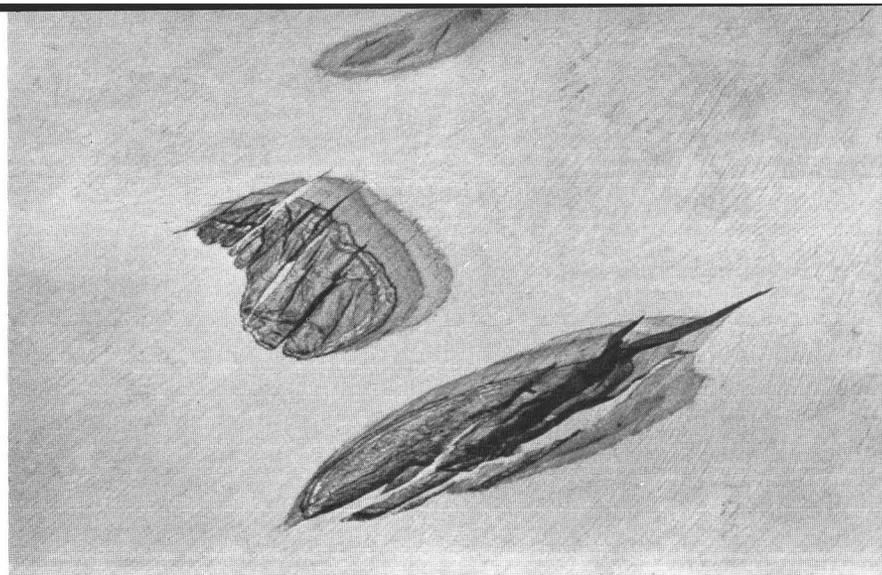


Bild 8

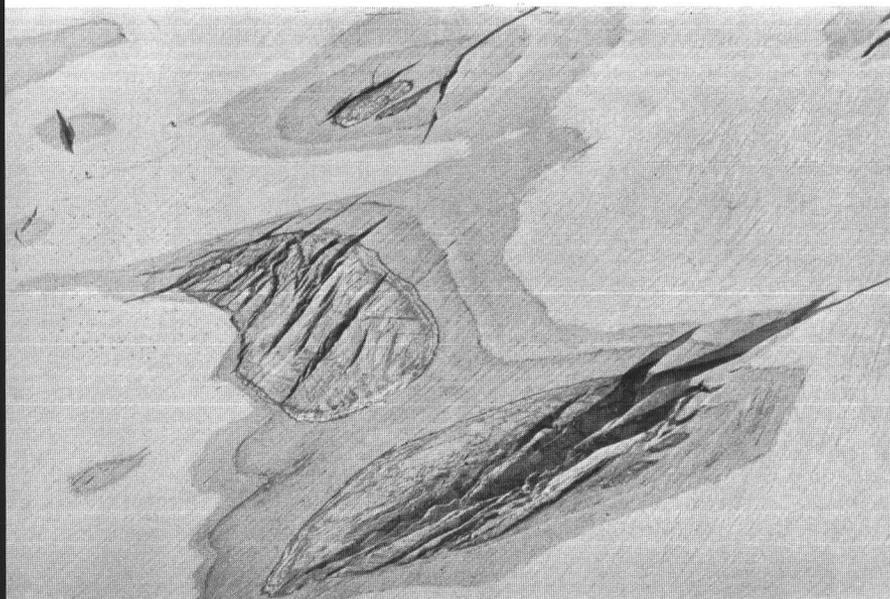


Bild 9

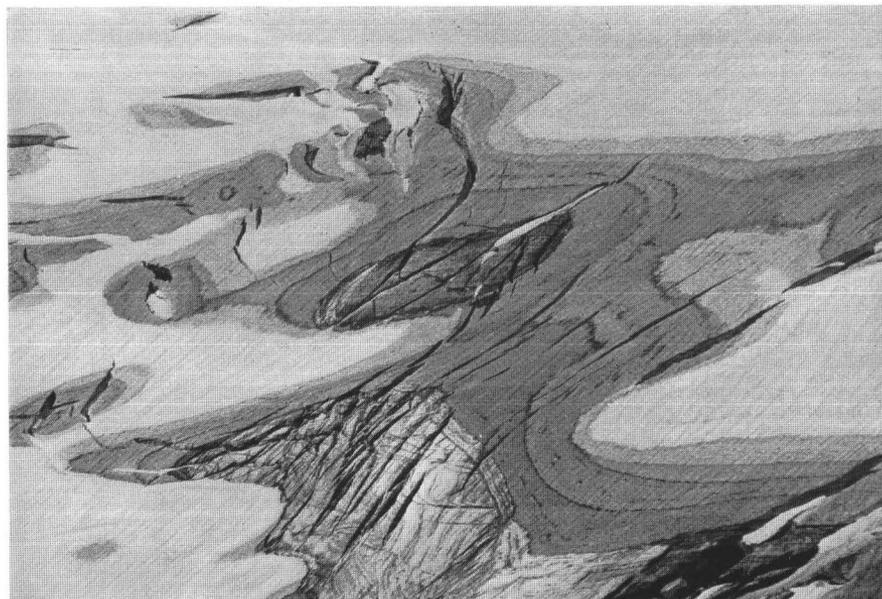


Bild 10

Zu nebenstehenden Bildern 5 und 6:

Das Stubacher Sonnblickkees am 30. August 1968 (links oben) und im Jahre 1940 (links unten). Die Aufnahme von G. Roßmanith ist aus der Zeitschrift des Deutschen Alpenvereins (Band 73, Tafel 20, München 1942) reproduziert. Der Vergleich der Bilder zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der konkaven und konvexen Zonen des Gletschers und damit ein ähnliches Ausaperungsmuster trotz des starken Eisschwundes und der damit verbundenen Änderung der Gletscheroberfläche in den rund 30 Jahren, die zwischen den Aufnahmezeitpunkten liegen.

Zu den Bildern 7 bis 10 der umseitigen Tafel VII:

Das Firngebiet des Stubacher Sonnblickkees am 13. September 1966 mit dem „Ablationsbuckel“ in der Bildmitte (Bild 7). Dieser „Ablationsbuckel“ am 2. August 1967 (Bild 8), am 30. August 1967 (Bild 9) und am 10. August 1969 (Bild 10). Alle Aufnahmen von H. Slupetzky. Die vier Bilder zeigen das Ausschmelzen von Eisbuckel. Bild 7 zeigt zwei apere Buckel, an denen unter dem hellen Altschnee von 1966 der dunklere Firn vom Vorjahr ausstreicht. Die Bilder 8—10 zeigen dieselben Buckel zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Ausaperung greift, an den konvexen Zonen beginnend, immer weiter aus, wobei der Abschmelzungsprozeß asymmetrisch vor sich geht. Ältere Firnschichten sind deutlich an der stärkeren Verschmutzung zu erkennen. Nach dem blanken Eis schließt die Firnlage von 1965 an, die weiteren Firnschichten sind wie Jahresringe bis herauf zum jüngsten, hellen Altschnee abzuzählen. Zwischen dem Eis und der Firngrenze (hier vom 1965er Firn gebildet) ist ein schmaler Saum von Aufeis zu beobachten.

Berichtigung

Durch ein technisches Versehen wurden im Aufsatz von H. Slupetzky die Klischees von Bild 3 und Bild 6 vertauscht.

Das Klischee von Bild 3 gehört auf Tafel VI unten und das Klischee von Bild 6 auf Tafel V oben. In dieser Anordnung stimmen die Bilder mit den Bildtexten überein.

Bei der Untersuchung der Ausaperung an Buckeln konnte der Lösung weiterer Fragen nachgegangen werden. Man findet sehr häufig die Altschneelinie und Firnlinie und die Firnschichten im Bereich dieser konkaven Stellen nach bestimmten Regeln angeordnet.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Schneedecke an den Buckeln zuerst durchbrochen wird und der weitere Ablauf des Schmelzprozesses durch diese Stellen vorgegeben und davon abhängig ist. Auf Bild 7 (Tafel IV) ist der „Ablatiobuckel“ und die umgebenden Gletscherzonen abgebildet. Bild 8 und 9 (Tafel IV) zeigen das Ausgreifen der Ablation und Bild 10 (Tafel IV) den Zusammenschluß der Aferflächen. Das Ausschmelzen der Buckel und Rücken geht überwiegend asymmetrisch vor sich. Unterhalb eines Buckels schließt sofort die temporäre Altschneelinie an und es grenzt das Eis direkt an den Altschnee, oberhalb kommen zuerst ältere Firnschichten zutage und die Firngrenze bildet die Begrenzung zum Eis (z. B. Bild 8, Tafel IV). Bei fortschreitendem Abbau der Altschneedecke bleibt diese Regel insoferne aufrecht, als oberhalb der Aufwölbung immer ältere, unterhalb stets jüngere Firnschichten Kontakt mit dem Eis haben. Eine komplette Schichtfolge ist, wenn sie auftritt, nur oben anzutreffen. Die Asymmetrie ist auch dann vorhanden, wenn der Gletscher sehr stark ausapert. Die Verhältnisse sind mit geologischen Strukturen vergleichbar. Asymmetrische Synklinalen und Antiklinalen wechseln am Gletscher ab. Die Asymmetrie wird durch die wechselnde Schichtdicke und vom Winkel unter dem die Oberfläche die Schichtpakete schneidet, bestimmt.

Die Asymmetrie entsteht aus mehreren Gründen. Erstens werden durch die Eisbewegung ältere Firnlagen zum oberen Teil der Buckel transportiert und vom unteren weg in die Tiefe bewegt. Es hängt dies eng mit der horizontalen und vertikalen Komponente der Gletscherbewegung an Buckelzonen, besonders mit dem Winkel, den die Eisoberfläche mit den austreichenden oder eintauchenden Bewegungslinien einnimmt, zusammen. Die Bewegung des Gletschers, die an den Buckeln 5—10 m im Jahr beträgt, ist so groß, daß in den vergangenen zwei Jahren nicht nur die Firnschichten 1965 bis 1969 lückenlos zutage kamen, sondern auch sehr alte Firn- und Eislagen aus der Zeit vor 1958 auftauchten¹⁶. Zweitens ist Schneeakkumulation in den konvexen Teilen, die direkt oberhalb der Kulmination eines Buckels anschließen, geringer als in der Mulde. Der Schnee wird weggeweht und unterhalb des Buckels angelagert. Drittens spielt der Abbauvorgang der Schneedecke selbst eine große Rolle. Es ist nicht nur die Witterung, die sich auswirkt. Auch mikro-klimatische Unterschiede führen an den Buckelzonen zu einem verschieden raschen Abbau, wobei besonders kleinräumige Differenzierungen der Albedo auftreten. Die Altschneeschiebe oberhalb von Buckeln liegt meist als dünne Auflage auf älteren Firnlagen und nimmt gegen oben nur langsam an Mächtigkeit zu. Der Rand der Altschneedecke löst sich je nach Beschaffenheit der Schneeoberfläche (Wabenstruktur etc.) und der Schneehöhe auf und bildet eine perforierte Übergangszone. Auch Schmelzwasserrinnen können die Altschneeaufgabe zerfurchen (vergleiche Bild 3, Tafel II). Unterhalb der Buckel nimmt die Schneehöhe rascher zu. Auch darf nicht übersehen werden, daß die Tiefer-

¹⁶ Pegel, die vor mehreren Jahren im Oberteil von Buckeln in der Nähe der örtlichen Firngrenze eingebohrt wurden, sind abwärts bewegt worden und befinden sich jetzt unterhalb der Buckel an der Altschneelinie oder sind in den Firnschichten der anschließenden Mulden verschwunden. Mit Hilfe der jährlichen geodätischen Einmessungen wird in Zukunft eine exaktere Erklärung möglich sein.

legung der Altschneeoberfläche — jetzt in einem größeren Maßstab gesehen — nicht parallel zur Oberfläche vor sich geht.

Alle Faktoren, die zur Asymmetrie der Aperfiguren führen, treten in komplexer Wirkung auf und sind nicht voneinander zu trennen. Es scheint jedoch, daß sie überwiegend mit gleichen Vorzeichen wirken.

Die Geschwindigkeit der Ausaperung bzw. welche Stadien der Gletscher im Laufe eines Jahres erreicht, hängt von der Witterung während des Haushaltsjahres ab. Die Wirkung der Witterung ist sehr komplex. Dem Witterungscharakter des Sommers kommt i. A. größere Bedeutung zu, der Einfluß der winterlichen Witterungsverhältnisse ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Eine Änderung der winterlichen Akkumulationsbedingungen ist nur sehr selten deutlich in der Ausaperungsstruktur des nachfolgenden Sommers ausgeprägt. Sind während eines Winters infolge der Häufung bestimmter Wetterlagen einzelne Expositionen bei der Schneeablagerung bevorzugt, findet (anscheinend) durch den Reliefeffekt ein Ausgleich statt. Feststellbare Unterschiede hängen auch von der Größe des beobachteten Geländeausschnittes ab. Differenzen, die am Anfang einer Ablationsperiode auftreten, werden noch dazu von den sommerlichen Ablationsverhältnissen überprägt und ausgeglichen, H. SLUPETZKY [7] S. 108 f. Ob eine überdurchschnittlich hohe Winterschneedecke oder zahlreiche Neuschneefälle im Sommer den Gletscher vor Ablation schützen, letztlich wirkt sich beides auf ein verzögertes Ab- und Ausschmelzen und damit auf das Erreichen eines vorgeschrittenen Ausaperungsstadiums aus. Beschleunigend wirken warme, niederschlagsarme, strahlungsreiche Sommer.

Je ähnlicher die meteorologischen Bedingungen der einzelnen Jahre sind, umso eher sind die Eintrittszeiten bestimmter Stadien gleich. Je größer die Unterschiede, umso differenzierter ist der Ablauf der Ausaperung. Als besonders konträr sind hier die Jahre 1964 und 1965 anzuführen.

Es ist sehr aufschlußreich, den Zeitpunkt, zu dem der Gletscher während einer Ablationsperiode ein bestimmtes Stadium erreicht, festzuhalten. Beispielsweise erreichte das Stubacher Sonnblickkees annähernd das Stadium 9:

1961 am 16. September	1965 überhaupt nicht
1963 im Juni	1966 am 17. Oktober
1964 im Juni	1968 am 30. August.

Der gleiche Stand der Ausaperung, wie er auf Bild 3 und 4 (Tafel II) zu sehen ist, wurde im Jahre 1969 schon am 12. August und 1970 erst am 26. September erreicht. Als weiteres Beispiel dient das glaziologisch wichtige Stadium 7, weil hier Angaben über einen Zeitraum von 10 Jahren gemacht werden können. Dieses Ausaperungsstadium trat ein ¹⁷:

1960 Ende August	1964 Mitte Juli	1968 nicht erreicht
1961 Ende September	1965 nicht erreicht	1969 Mitte August
1962 Ende August	1966 nicht erreicht	1970 Ende September.
1963 im Juli	1967 nicht erreicht	

Die Beobachtung der Ausaperungsstadien während eines Haushaltsjahres macht es möglich, ohne genauere Messungen eine Vorstellung über die momentane Situation des Gletschers und seiner Massenbilanz zu gewinnen. Auch ist daraus

¹⁷ Eine genaue zeitliche Angabe kann erst nach genauerer Ausarbeitung des Forschungsmaterials erfolgen.

schon ganz allgemein auf den gletschergünstigen oder abträglichen Witterungscharakter einer Ausaperungsphase zu schließen.

Beim alljährlichen Ausaperungsvorgang können Unterschiede aufscheinen, die jedoch gegenüber den großen Gesetzmäßigkeiten zurücktreten. Sie sind vom Zeitfaktor abhängig. Bei Anfangsstadien können witterungsbedingte Differenzen vorhanden sein, die beim Vergleich der Endstadien nicht mehr zu beobachten sind. Je länger der Zeitraum, umso mehr findet ein Ausgleich der Zufälligkeiten statt. Dies gilt aber nicht bei einer Gegenüberstellung von Ausaperungsstadien über Jahre und Jahrzehnte, wo sich die Unterschiede je nach Tendenz der Klimaschwankungen vergrößern und die Divergenzen in den Detailstrukturen bald übersteigen können.

Ein Beispiel soll zeigen, wie in den einzelnen Jahren leichte Variationen im Ausaperungsgeschehen vom spezifischen Witterungsablauf abhängen. 1967 konnte beobachtet werden, daß die Untere Kante (die Gletscherstirn), nicht wie sonst üblich früher, sondern später als die Obere Kante ausaperte. Gegen Ende des Jahres war aber das „normale“ Stadium wieder erreicht. Verursacht wurde die Abweichung durch mehrere zeitlich besonders verteilte sommerliche Schneefälle und die Höhenlage der temporären Neuschneegrenze.

Lawinen, vor allem Schneebleter bringen nur unbedeutende Änderungen. Auch eine Umgestaltung der Spaltensysteme kann im Detail Wandlungen herbeiführen. Bemerkenswert ist die Wirkung vorhergehender Ausaperungsverhältnisse auf die folgenden. Der maximale Ausaperungsstand des Vorjahres hat einen nicht unbeträchtlichen Einfluß auf den Ablauf der Ausaperung im nächsten Jahr. Dabei kann die Wirkung mit verschiedenem Vorzeichen auftreten. Ein ähnliches Ausapern findet solange statt, bis der Stand der maximalen Ausaperung des Vorjahres mit der damaligen Verteilung der Altschnee-Firn- und Eisflächen erreicht ist. Erst dann können wieder relative Unterschiede auftreten. Die Störungen hängen davon ab, welcher Art die unter der Altschneedecke ausapernde Unterlage ist. Hier ist wieder die Wirkung der verschieden schmutzigen Firnlagen zu nennen (vgl. Fußnote 13).

Einen gravierenden Einfluß haben extreme Witterungsverhältnisse. Vor allem dann, wenn sie zwei oder mehrere Jahre hintereinander mit gleicher Tendenz auftreten. Die strahlungsreichen Sommer 1963 und 1964, führten zu stark negativen Haushaltsjahren. Fast der gesamte Gletscher war schneefrei (Stadium 0) und bestehende Gegensätze im Kleinrelief der Eisoberfläche wurden vertieft. Die Altschneelinie und Firngrenze paßte sich Detailstrukturen (wie z. B. aufgedeckte Spaltenzonen) an. Sehr schneereiche Winter mit geringer sommerlicher Abschmelzung gleichen die Oberfläche etwas aus. 1965 und im folgenden Jahr 1966 war dies der Fall.

Alle genannten Faktoren bringen nur relative Abweichungen im Detailverlauf der Altschneelinie, sie sind aber wieder nicht so wirksam, daß sie entscheidende Unterschiede in der Art und Struktur der Ausaperung verursachen. Erst nach einem längeren Zeitraum kommen sie bei gleichbleibenden Tendenzen gravierend zum Durchbruch.

Die sommerlichen Neuschneefälle spielen eine wichtige Rolle bei der Geschwindigkeit der Ausaperung des Gletschers und damit beim Abbau der Altschneedeckung. Ohne die Neuschneefälle würde die Altschneedecke kontinuierlich zurückweichen. Die Stadienabfolge wäre laufend zu verfolgen. Die Schneefälle bringen die größten Störungen im Ablauf der Ausaperung. Je nach Anzahl und zeitlicher Dichte der Schneefälle und je nach Menge des abgelager-

ten Neuschnees wird der Schmelzvorgang mehr oder weniger stark unterbrochen und verzögert. Der Neuschnee wird wegen seines hohen Reflexionsvermögens nur langsam abgebaut. Je nach Schneemenge und Witterung verzögert sich die Fortsetzung des Abschmelzungsprozesses der Altschneedecke um mehrere Tage oder Wochen. So war das Haushaltsjahr 1965 deswegen so früh beendet, weil ab dem 25. August eine mehrere Wochen andauernde kühle Witterungsperiode auftrat. Zahlreiche intensive Schneefälle¹⁸ deckten damals den Gletscher zu. Die Schneefallgrenze erreichte sogar zeitweise die Talböden der Tauerntäler. Der Abbau der Neuschneedecke geht nicht nach den Gesetzen des Abbaues der Altschneedecke vor sich (FRIEDEL [2]), es ist jedoch bis zu einem gewissen Grad immer eine Abhängigkeit vom Relief vorhanden, das sich aber hier mehr in den unterschiedlichen Expositions- und Neigungsverhältnissen bemerkbar macht.

Auf Grund der detaillierten Analyse und Kartierung der jährlichen Ausaperungsstände und -stadien ist festzustellen, daß der Abbau der Schneedecke gesetzmäßig vor sich geht und von der spezifischen Topographie der Gletscheroberfläche abhängt. Die Kenntnis über diese Vorgänge ermöglicht es, eine Reihe von Schlußfolgerungen zu ziehen. Je nach Fragestellung ist es bei Forschungen an Gletschern notwendig, diesen Komplex zu berücksichtigen. Besonders bei Massenbilanzstudien ist die eingehende Kenntnis über den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Altschneelinie bzw. die Abhängigkeit der Ausaperung von Topographie und Witterung wichtig. Umsomehr dann, wenn der Gletscher stark von einem regelmäßig gebauten Typ abweicht und Zahlenwerte für die Höhenlage der Altschneelinie nicht einfach anzugeben sind. Auch die Berechnung der Bilanz wird außerordentlich erleichtert und wesentlich genauer. Für das Ausmaß der Ablation und die Akkumulationsmenge ist es nicht gleichgültig, wie lange ein Punkt des Gletschers aper oder schneebedeckt ist. Nicht nur quantitativ, auch qualitativ ergibt sich eine funktionelle Beziehung. Der Verlauf der Isolinien gleicher Akkumulation und Ablation ist zu einem gewichtigen Teil von den Strukturen der Ausaperungsstadien abhängig, speziell mit dem jeweiligen Verlauf der Altschneelinie und temporären Altschneelinie. Damit ist nicht nur der Fall gemeint, daß mit der Kartierung des Verlaufes der Altschneelinie die 0-Isolinie festgelegt wird. Auch andere Isolinien scheinen mit bestimmten temporären Altschneelinienstrukturen in Beziehung zu stehen.

Die Kartierungen sind mittelbar auch Voraussetzung für die Ableitung von Flächenverhältnissen, wie etwa die Verhältnisse Nährgebiet zu Zehrgebiet oder Nährgebiet zur Gesamtgletscherfläche (vgl. Fußnote 12), die mit der Massenbilanz in Beziehung stehen¹⁹.

Zugleich mit den Kartierungen ist auch eine wichtige Komponente des Wärmehaushaltes, soweit dieser von der unterschiedlichen Albedo der die Gletscheroberfläche bildenden Substanzen abhängt, erfaßt.

¹⁸ Die sommerlichen Neuschneefälle haben einen starken Einfluß auf den Haushalt der Gletscher und damit auf Gletscherschwankungen [22, 23]. „Daß der Sommerschnee für die Gletscher vielleicht von entscheidender Wichtigkeit sein könne und daß eine mehrmalige Wiederholung derartiger Bedeckungen einen ganzen Sommer um seine Wirkung bringen kann, hatte E. RICHTER [24], S. 291 bereits vor mehr als 80 Jahren erkannt“ (zitiert nach H. HOINKES [17]).

¹⁹ U. U. ist es möglich, bestimmte Funktionen zwischen dem Massenhaushalt und den Flächenverhältnissen auf Grund der Ausaperungsstadienkartierung und Zwischenbilanzberechnungen während des Sommers in wenigen Jahren zu erhalten (H. SLUPETZKY [7] S. 118 f.). Auch die Abschätzung des momentanen Haushaltes durch Beurteilung des Ausaperungsstadiums scheint gut möglich [7].

6. Schlußbetrachtung

Die vorliegenden Ausführungen sind das Ergebnis der Erforschung der aktuellen Vorgänge und Abläufe der Ausaperung am Stubacher Sonnblickkees. Es wurde den Gesetzmäßigkeiten im Abbau der Schneedecke nachgegangen und den am Gletscher vorhandenen Grenzlinien besonderes Augenmerk geschenkt. Die gewonnenen Kenntnisse über die Ausaperung können auch an anderen Gletschern angewendet werden. Besonders sollte aber bei Beginn neuer Untersuchungen getrachtet werden, ehestens eine komplette Reihe von Ausaperungsstadien zu erhalten.

Eine Differenzialanalyse vor allem der meteorologisch-klimatologischen Faktoren und eine Quantifizierung der Ergebnisse wäre wünschenswert gewesen. Es unterblieb dies aus mehreren Gründen. Erstens wurde der gesamte Komplex der Massenbilanzuntersuchungen, soweit dies im Einzelnen vertretbar war, bewußt ausgeklammert [7]. Zweitens soll in den nächsten Jahren durch eine weitere Verfolgung des Ausaperungsproblems neues Beobachtungsmaterial gesammelt und ausgewertet werden. Schließlich ist es ein schwieriges — wenn auch wünschenswertes — Unterfangen, auch den gesamten Umfang strahlungs-klimatologischer Studien durchzuführen. Für viele Teilgebiete muß daher auch in Zukunft auf die Untersuchungen und Ergebnisse anderer Wissenschaften zurückgegriffen werden²⁰.

7. Literaturverzeichnis

- [1] STEINHAUSER, F.: Die Schneeverhältnisse im Sonnblickgebiet. Ein Beitrag zur Wirkung des Alpenhauptkammes als Klimascheide; 63.—65. Jahresber. d. Sonnblickver. f. d. Jahre 1965—1967, Springerverl. Wien, 1968, S. 3—42.
- [2] FRIEDEL, H.: Gesetze der Niederschlagsverteilung im Hochgebirge. Wetter und Leben; Jg. 4, H. 5/7, Wien 1952, S. 73—86.
- [3] FRIEDEL, H.: Die alpine Vegetation des obersten Mölltales (Hohe Tauern); Wissenschaftliche Alpenvereinshefte Nr. 16, Univ. Verl. Wagner, Innsbruck 1965, S. 1—153.
- [4] QUECK, H.: Massenhaushaltsstudien am Kesselwandferner (Ötztaler Alpen); Eine Untersuchung über Gesetzmäßigkeiten in der Rücklagenstruktur und Rücklagenverteilung; Diss. Innsbruck 1966, S. 1—124.
- [5] HOINKES, H.: Über die Schneeumlagerung durch den Wind. (Ein Beitrag zur Frage der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Niederschlagstotalisatoren im Hochgebirge). 51.—53. Jahresber. d. Sonnblickvereins. Wien 1957, S. 27—32.
- [6] HOINKES, H. u. H. LANG: Der Massenhaushalt von Hintereis- und Kesselwandferner (Ötztaler Alpen) 1957/58 und 1958/59; Archiv f. Met., Geoph. u. Biokl., Serie B, Bd. 12, H. 1, Springerverl. Wien 1962, S. 284—320.
- [7] SLUPETZKY, H.: Glaziologische und glazialmorphologische Untersuchungen im obersten Stubachtal (Hohe Tauern) unter besonderer Berücksichtigung der Massenhaushaltsuntersuchungen am Stubacher Sonnblickkees in den Jahren 1963—1968. Diss. Phil. Fak. Wien, 1968, S. 1—194.
- [8] SLUPETZKY, H.: Die hochalpinen Forschungen in der Granatspitz- und westl. Glocknergruppe in den Hohen Tauern; Mitt. Österr. Geogr. Ges. Bd. 109, H. 1—3, Wien 1967, S. 88—99.
- [9] LUCERNA, R.: Luftaufnahmen der augenblicklichen Firn- und Gletschergrenze; Zeitschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. XXI, 1933/34, Leipzig 1934, S. 143—145.
- [10] ZINGG, T.: Die Bestimmung der Schneehöhenverteilung auf photogrammetrischem Wege; Congress IUGG, Rome, IASH., Publ. No. 39, Tome IV, Gentbrugge (Belgique) 1954, S. 33—37.
- [11] LUDWIG, H.: Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie an der Technischen Hochschule in München. München 1964.
- [12] RENTSCH, H.: Diplomarbeit am Inst. f. Phot., Topogr. u. Allgem. Kart. der TH München, München 1964.
- [13] SCHLAGINTWEIF, H. u. A.: Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen. Leipzig 1850, S. 1—600.
- [14] DRYGALSKI, E. und F. MACHATSCHEK: Gletscherkunde; Enzyklopädie der Erdkunde; F. SCHEIBNER und W. MAHRINGER (Hrsg.). Wien 1942, S. 1—261.

²⁰ Es können etwa die glazialmeteorologischen Forschungen am Hintereisferner herangezogen werden. Hier wurde und wird seit nunmehr 20 Jahren [17] systematisch der Lösung vieler glaziologischer und meteorologischer Fragen nachgegangen [25, 26, 4, 28]. In diesem Forschungsgebiet und bei anderen Untersuchungen wurde auch dem Problem des Energiehaushaltes der Gletscheroberfläche besondere Aufmerksamkeit zugewendet (H. HOINKES [17], vgl. die zahlreichen Literaturangaben; F. SCHEIBNER und W. MAHRINGER [27]). Auch der den Geographen sehr interessierende Komplex der Bestimmung der klimatischen Schneegrenze muß neu überdacht werden [29].

- [15] Technical papers in hydrology: Seasonal snow cover. A contribution to the Internat. Hydrol. Decade. UNESCO, IASH, WMO. Publ. by UNESCO, Paris 1970, S. 1—38.
- [16] Technical papers in hydrology: COMBINED HEAT, ICE AND WATER BALANCES AT SELECTED GLACIER BASINS. A contribution to the IHD; UNESCO, IASH; Publ. by UNESCO, Paris 1970 S. 1—20.
- [17] HOINKES, H.: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hinterelsferner (Ötztaler Alpen) 1953—1968; Zeitschrift f. Gletscherkunde und Glazialgeol., Bd. VI, H. 1, 1971, S. 37—90; (Zahlr. Lit.-Angaben).
- [18] Anonym. MASS-BALANCE TERMS; Journal of Glaciology, vol. 8, No. 52, London 1969, p. 3—7.
- [19] AMBACH, W.: Die Bedeutung des aufgefrorenen Eises (superimposed ice) für den Massen- und Energiehaushalt eines Gletschers; Ztschr. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. IV, H. 3, Innsbruck 1961, S. 169—189.
- [20] KLEBELSBERG, R. v.: Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie; 1. Bd., Springerverl. Wien 1948, S. 1—403.
- [21] HOINKES, H.: Glacial meteorology. Research in Geophysics, vol. 2, Solid Earth and Interface Phenomena, M. I. T. Press, Cambridge 1964, p. 391—424.
- [22] FLIRI, F.: Zur Witterungsklimatologie sommerlicher Neuschneefälle in den Alpen; Wetter und Leben, Jg. 16, Wien 1964, S. 1—11.
- [23] TRONOV, M. V.: On the role of summer snowfall in glacier variation; ICSI, Symposium of Obergurgl 1962, IASH Publ. No. 58, 1962, S. 262—269.
- [24] RICHTER, E.: Die Gletscher der Ostalpen. Engelhorn Verl. Stuttgart, 1888.
- [25] WENDLER, G.: Die Vergletscherung in Abhängigkeit von Exposition und Höhe und der Gebietsniederschlag im Einzugsgebiet des Pegels Vent in Tirol; Archiv f. Met., Geoph. u. Biokl., Serie B, Bd. 15, H. 3, Wien 1967, S. 260—273.
- [26] HOINKES, H. u. G. WENDLER: Der Anteil der Strahlung an der Ablation von Hinterels- und Kesselwandferner (Ötztaler Alpen, Tirol) im Sommer 1958; Arch. f. Met., Geoph. u. Biokl., Serie B, Bd. 16, Wien 1968, S. 195—236.
- [27] SCHEIBNER, F. und W. MAHRINGER: Die Albedo der Sonnblickgletscher und ihre zeitlichen Variationen. Arch. f. Met., Geoph. u. Biokl., Serie B, Bd. 16, 1968, S. 174—194.
- [28] HOINKES, H.: Ergebnisse des glazial-meteorologisch-hydrolog. IHD-Programmes im Roßental bei Vent 1964—1968; Österr. Wasserwirtschaft, Jg. 22, H. 5/6, Wien 1970, S. 101—113.
- [29] ØSTREM, G.: The height of the glaciation limit in southern British Columbia and Alberta; Geografiska Annaler, vol. 48, Ser. A., Stockholm 1966, p. 126—138.

Zusammenfassung

Am Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern) wurde seit 1960 die Art und Weise der Ausaperung des Gletschers verfolgt. Der jährliche Rückzug der Schneedecke bzw. der Verlauf und die Schwankungen der temporären Schneegrenze (= temporäre Altschneelinie) wurde kartiert. Aus den Beobachtungen und Kartierungen in den Jahren 1963 bis 1966 und unter Verwendung weiterer Untersuchungen bis 1970 wurde die Gesetzmäßigkeit der Ausaperung abgeleitet.

Das Stubacher Sonnblickkees, ein Hanggletscher mit einer Fläche von 1,6 km² (1963) ist uneinheitlich gegliedert und weist eine unruhige Topographie der Oberfläche auf. Er ist in einzelne Steilstellen und flache Sammelmulden gegliedert. Demzufolge ist auch kein regelmäßiges Höherwandern der temporären Altschneelinie während der sommerlichen Ablationsperiode, wie dies annähernd bei Talgletschern der Fall ist, zu beobachten, sondern ein kompliziertes Ausapern. Die Verteilung der aperen und schneebedeckten Zonen hängt in erster Linie von der spezifischen Topographie der Gletscheroberfläche ab. Die Lage der Flächen zueinander bleibt von Jahr zu Jahr gleich, nur ihre Ausdehnung wechselt. Die Art der Ausaperung geht gesetzmäßig vor sich und hängt von der Topographie der Gletscheroberfläche ab, die Geschwindigkeit der Ausaperung während eines Jahres oder welche Stadien der Gletscher durchläuft oder erreicht, von den Witterungsverhältnissen ab. Die Lagekonstanz der Aperfiguren bleibt auch über größere Zeiträume (mehrere Jahrzehnte) erhalten, wie Fotovergleiche zeigen. Die Gesetzmäßigkeit der Schneeablagerung im Hochgebirge und ihre Verteilung, wie sie von H. FRIEDEL untersucht wurden, konnte bestätigt werden.

Die Methoden und Ziele der Kartierung der Schneedeckenmuster auf dem

Gletscher werden beschrieben. Es werden die verwendeten Begriffe erläutert. Im Hauptteil werden die Analysen der Ausaperungsverhältnisse und der auftretenden Gesetzmäßigkeiten dargestellt und Ergebnisse vorgeführt. Abschließend wird kurz auf die Bedeutung von Schneedeckenkartierungen, besonders für die Massenbilanzuntersuchungen, für Wärmebilanzmessungen auf Gletschern und für die Bestimmung der Schneegrenze hingewiesen. Die bei den Studien am Stubacher Sonnblickkees gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse können auch bei der Erforschung anderer Gletscher angewandt werden. Der Arbeit sind zwei Mehrfarbentabellen (Karte des Stubacher Sonnblickkees 1 : 5000 und Karte der Ausaperungsstände in den Jahren 1963—1966 1 : 25.000) beigelegt, bei denen erstmals das Firngebiet dargestellt wurde.

S u m m a r y

The way how the Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern) becomes snowfree. Results of the survey of the transient snowline

Since 1960 the way how the Stubacher Sonnblickkees becomes snowfree (Ausaperung) has been investigated. The annual retreat of the snow cover, the variations of the transient snow line respectively has been mapped in detail. From observations and results of survey during the period of 1963 to 1966 and utilization of further investigations up to 1970 the regularity of the „Ausaperung“ has been deduced.

The Stubacher Sonnblickkees, a slope glacier covering an area of 1,6 sqkm (1963) is differentiated inhomogeneously and its surface shows a broken topography. It shows several steep slopes and flat basins. Therefore no regular rise of the transient snow line during the summer ablation-period can be observed, as eventually is the case with valley glaciers but a complicated process of getting snow free. The distribution of the snow free and snow covered areas is due especially to the specific topography of the glacier-surface. The position of the areas does not change from year to year but their extension varies. The way of the „Ausaperung“ proceeds regularly and depends on the topography of the glacier surface; the speed of this process during a year or which stage of disappearance of the snow the glacier passes through or attains is due to the weather conditions during this year. The stability of the position of the patterns of the snow free areas is preserved even during longer periods (several decades) as can be seen by comparison of photos. The similarity of the areal extend of the snow deposits in high mountain regions and their distribution as it has been investigated and described by H. FRIEDEL could be confirmed.

The present paper describes the methods and aims of the surveys of the conditions of the snow cover upon the glacier. The technical terms which have been used are explained. In the main part the conditions of the „Ausaperung“ are analysed and the occurring regularities and results presented. Finally the importance of the mapping of the conditions of the snow cover esp. for investigations of mass and heat-balances on the glaciers and concerning the determination of the snow limit are pointed out in a short way. The methods and results of the studies at the Sonnblickkees can be exploited for the investigation of other glaciers. Attached to the paper are two multi-coloured maps of the Stubacher Sonnblickkees showing for the first time the firn area.

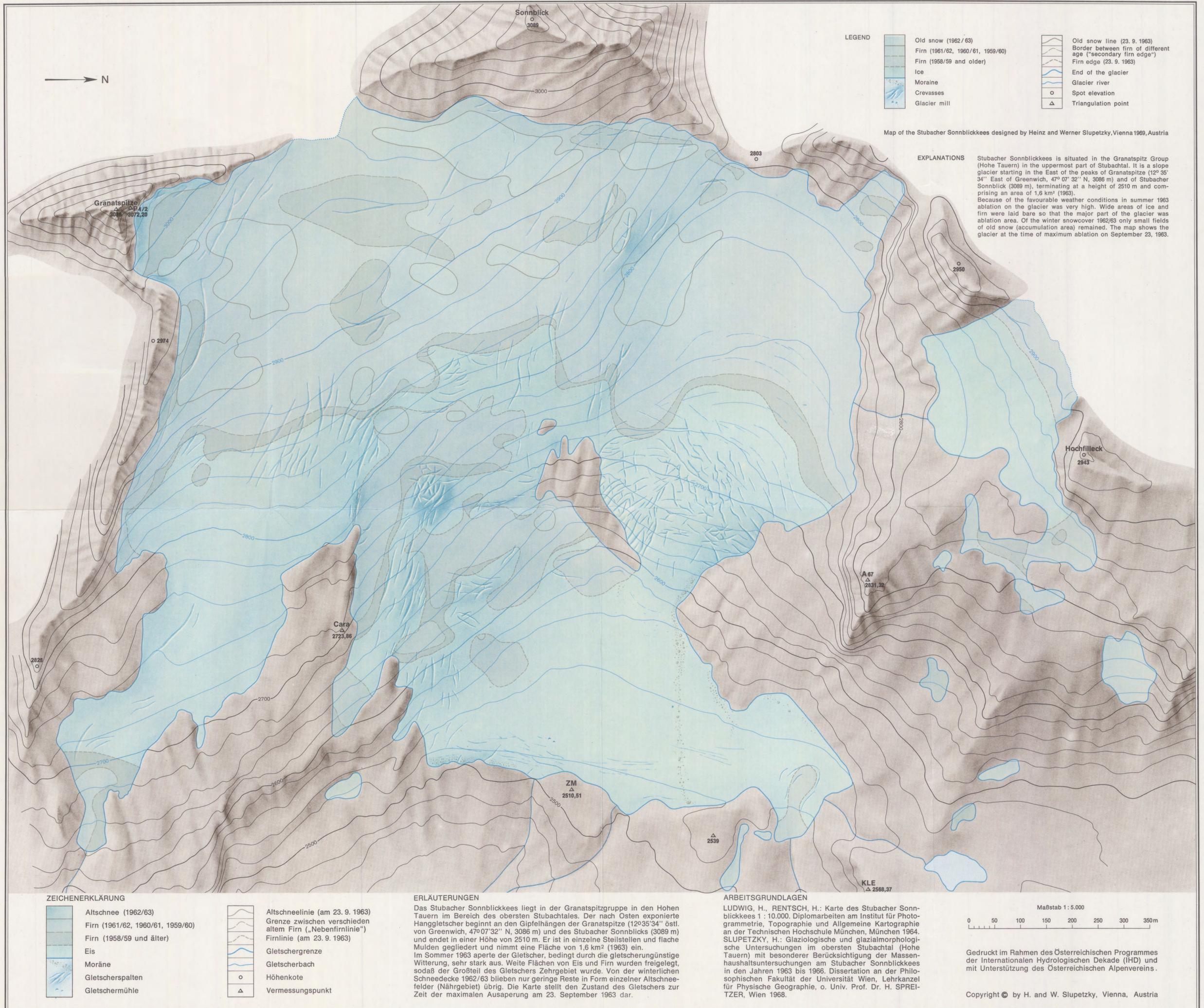
R é s u m é

Le processus de l'ablation de neige sur le glacier „Stubacher Sonnblick“ (Hohe Tauern), Résultats des levés cartographiques de la ligne des neiges temporaire

Dès 1960, on poursuit des observations concernant les processus de l'ablation de neige sur le glacier „Stubacher Sonnblick“. La concentration annuelle de la couche de neige et les oscillations de la ligne temporaire des vieilles neiges sont fixées exactement par des levés cartographiques. Les résultats de ces observations et de ces levés, effectués de 1963 à 1966, et complétés par des recherches continuées jusqu'à 1970, permettent d'en déduire une régularité du processus de l'ablation.

Le glacier „Stubacher Sonnblick“ est un glacier atrophié, couvrant un versant par une aire de 1,6 qkm (en 1963); sa surface n'est pas du tout égale — le terrain est accidenté par des pentes raides et des cuvettes. En conséquence, l'élévation de la ligne des neiges durant la période d'ablation en été n'est pas régulière — comme on peut l'observer sur les glaciers de vallée approximativement —, elle est plus compliquée. La distribution des zones libres et de celles encore couvertes de neige dépend avant tout de la topographie spécifique de la surface de ce glacier. La situation de ces zones reste la même d'une année à l'autre, ce n'est que leur étendue qui change. L'ablation suit des régularités — elle dépend de la topographie du glacier; la vitesse de ce processus par contre, et par suite la dimension de l'ablation atteinte au cours d'une certaine année, dépendent des conditions météorologiques. La situation des zones, où la neige a disparu, produit sur le glacier l'effet de figures („Aperfiguren“) qui restent constantes durant des dizaines d'années, ce que prouve une comparaison de prises photographiques. Les régularités de l'accumulation et de la distribution des neiges dans la haute montagne, examinées et décrites par H. FRIEDEL, peuvent être confirmées.

Cette étude-là décrit les méthodes et les buts des levés cartographiques concernant la distribution des couches de neige sur le glacier; elle explique aussi les notions nécessaires. La partie principale analyse les observations faites de ce processus d'ablation de neige et traite les régularités qui en résultent. Elle accentue l'importance de telles recherches pour l'évaluation du bilan glaciaire, du bilan thermique sur les glaciers, et pour la détermination de la ligne des neiges. Les expériences et reconnaissances résultant de l'étude du glacier „Stubacher Sonnblick“ peuvent être appliquées pour l'exploration d'autres glaciers aussi. — Sur deux cartes multicolores, ci-jointes, la configuration du névé est représentée pour la première fois.



LEGEND

	Old snow (1962/63)		Old snow line (23. 9. 1963)
	Firn (1961/62, 1960/61, 1959/60)		Border between firn of different age ("secondary firn edge")
	Firn (1958/59 and older)		Firn edge (23. 9. 1963)
	Ice		End of the glacier
	Moraine		Glacier river
	Crevasse		Spot elevation
	Glacier mill		Triangulation point

Map of the Stubacher Sonnblickkees designed by Heinz and Werner Slupetzky, Vienna 1969, Austria

EXPLANATIONS

Stubacher Sonnblickkees is situated in the Granatspiz Group (Hohe Tauern) in the uppermost part of Stubachtal. It is a slope glacier starting in the East of the peaks of Granatspiz (12° 35' 34" East of Greenwich, 47° 07' 32" N, 3086 m) and of Stubacher Sonnblick (3089 m), terminating at a height of 2510 m and comprising an area of 1,6 km² (1963).
 Because of the favourable weather conditions in summer 1963 ablation on the glacier was very high. Wide areas of ice and firn were laid bare so that the major part of the glacier was ablation area. Of the winter snowcover 1962/63 only small fields of old snow (accumulation area) remained. The map shows the glacier at the time of maximum ablation on September 23, 1963.

ZEICHENERKLÄRUNG

	Altschnee (1962/63)		Altschneelinie (am 23. 9. 1963)
	Firn (1961/62, 1960/61, 1959/60)		Grenze zwischen verschieden altem Firn („Nebenfirnlinie“)
	Firn (1958/59 und älter)		Firnlinie (am 23. 9. 1963)
	Eis		Gletschergrenze
	Moräne		Gletscherbach
	Gletscherspalten		Höhenkote
	Gletschermühle		Vermessungspunkt

ERLÄUTERUNGEN

Das Stubacher Sonnblickkees liegt in der Granatspitzgruppe in den Hohen Tauern im Bereich des obersten Stubachtals. Der nach Osten exponierte Hanggletscher beginnt an den Gipfelhängen der Granatspiz (12° 35' 34" östl. von Greenwich, 47° 07' 32" N, 3086 m) und des Stubacher Sonnblicks (3089 m) und endet in einer Höhe von 2510 m. Er ist in einzelne Steilstellen und flache Mulden gegliedert und nimmt eine Fläche von 1,6 km² (1963) ein. Im Sommer 1963 aperte der Gletscher, bedingt durch die gletscherungünstige Witterung, sehr stark aus. Weite Flächen von Eis und Firn wurden freigelegt, sodaß der Großteil des Gletschers Zehrgebiet wurde. Von der winterlichen Schneedecke 1962/63 blieben nur geringe Reste in Form einzelner Altschneefelder (Nährgebiet) übrig. Die Karte stellt den Zustand des Gletschers zur Zeit der maximalen Ausaperung am 23. September 1963 dar.

ARBEITSGRUNDLAGEN

LUDWIG, H., RENTSCH, H.: Karte des Stubacher Sonnblickkees 1 : 10.000. Diplomarbeiten am Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie an der Technischen Hochschule München, München 1964.
 SLUPETZKY, H.: Glaziologische und glazialmorphologische Untersuchungen im obersten Stubachtal (Hohe Tauern) mit besonderer Berücksichtigung der Massenhaushaltsuntersuchungen am Stubacher Sonnblickkees in den Jahren 1963 bis 1966. Dissertation an der Philosophischen Fakultät der Universität Wien, Lehrkanzel für Physische Geographie, o. Univ. Prof. Dr. H. SPREITZER, Wien 1968.



Gedruckt im Rahmen des Österreichischen Programmes der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) und mit Unterstützung des Österreichischen Alpenvereins.

Copyright © by H. and W. Slupetzky, Vienna, Austria

STUBACHER SONNBLICKKEES (HOHE TAUERN): AUSAPERUNGSSTÄNDE IN DEN JAHREN 1963–1966

Bearbeitung und Entwurf: © Heinz und Werner Slupetzky

