ANALYSE DER VERÄNDERUNGEN VON DREI BENACHBARTEN ALPINEN GLETSCHERN IN DER GOLDBERGGRUPPE DER HOHEN TAUERN SEIT 1930

BÖHM Reinhard, Norbert HAMMER und Josef STROBL, Wien

(Mit 3 Bildern, 12 Abbildungen und den Tafeln I und II im Text, sowie 6 Kartenbeilagen)

INHALT

1. Der Gegenstand der Gletscherforschung 116
2. Methoden der Gletscherforschung. 117
2.1. Qualitative Methoden 118
2.2. Quantitative Methoden. 118
3. Methoden der Massenbilanzbestimmung und ihre Ergebnisse bei drei Gletschern der Goldberggruppe 118
3.1. Die direkte glaziologische Methode 118
3.2. Die hydrologisch-meteorologische Methode. 121
3.3. Die geodätische Methode zur Massenbilanzbestimmung 122
3.4. Neue Berechnungsmethoden für Bilanzgrößen 140
4. Arbeiten auf Modellgrundlage 141
5. Erklärungsversuch des unterschiedlichen Verhaltens der drei betrachteten Gletscher. 145
Zusammenfassung 150
Literatur. 150
Summary 151

1. DER GEGENSTAND DER GLETSCHERFORSCHUNG

Der feste Aggregatzustand Eis nimmt nur etwas mehr als 1% der frei (nicht chemisch gebunden) auf der Erde vorhandenen Wassermenge von ca. 1,4 Mrd. km³ ein, andererseits aber nahezu 100% der an der Erdoberfläche verfügbaren Süßwasserreserven. Der davon weitaus größte Teil (98,6%) befindet sich in den Polargebieten von Arktis und Antarktis. Diese enormen Flächen wirken steuernd auf die atmosphärische Zirkulation ein, der häufig nahe an besiedelten Gebieten gelegene „Rest" von knapp 200.000 km² vergletscherter Fläche (Zahlenangaben nach L. LLIBOUTRY, 1965) hat jedoch eine Vielzahl unmittelbar auf Leben und Wirtschaft wirksamer Einflüsse aufzuweisen.

Von den morphologischen und hydrologischen Veränderungen durch die Arbeit des schürfenden Eises einmal abgesehen, steht die Aufgabe von Gebirgsgletschern mittlerer Breiten als dynamische Speicher enormer Wassermengen im Vordergrund.

Je nach Niederschlagsregime der betroffenen Klimazone kann der Rhythmus von Rücklage und Auflösung von Reserven einen akzentuierenden oder auch ausgleichenden Einfluß auf das regionale Abflußverhalten ausüben, während für die Energiewirtschaft vor allem der im mehrjährigen Vergleich glättende Einfluß von Bedeutung ist. Die Wasserwirtschaft ganzer Staaten unterliegt somit dem steuernden Einfluß verhältnismäßig geringer Eisflächen. Dazu kommen noch vitale Interessen im Gebirge operierender Wirtschaftssektoren wie etwa Fremdenverkehr, Landwirtschaft und Bergbau.

Durch diese Einwirkungen auf die menschliche Ökosphäre entstand ein verständliches Interesse an Erfassung und Verständnis des Gletscherverhaltens, was zu einer engen Zusammenarbeit betroffener Wissenschaften wie Meteorologie, Geographie und Hydrologie führte, die sich wieder adäquater Formal- und Methodenwissenschaften bedienen. Während nun eine Arbeitsweise versucht, das Verhalten der Eismassen in den zurückliegenden Jahrtausenden zu ergründen und daraus Regelhaftigkeiten für die Zukunft abzuleiten, liegt das Hauptinteresse der modernen Gletscherforschung in einer möglichst exakten Erfassung des aktuellen Verhaltens und dessen Erklärung auf Grund morphologischer und meteorologischer Parameter. Dies geschieht durch Bilanzierung von Massen- und Energieströmen mit Hilfe eines ständig wachsenden Instrumentariums.

Eine Reihe von Rückkoppelungsmechanismen vermag, wie uns die Indizien vergangener Vereisungsphasen zeigen, Schwankungen im Betrag der vereisten Areale zu erzeugen, die weit über die in den letzten Jahren beobachteten Oszillationen hinausgehen. Da aber auch schon diese minimalen Veränderungen besonders in Gebirgsstaaten großen Einfluß auf die menschliche Aktivität ausüben, handelt es sich bei der Gletscherforschung um eine Umweltwissenschaft von aktueller Bedeutung. Ohne die Zuhilfenahme exakter Dokumente dieser Umwelt, wie sie von der Kartographie produziert werden, wäre diese Aufgabe kaum zu lösen. Welche Rolle kartographische Unterlagen in der allgemeinen Methodik der Gletscherforschung spielen, soll der folgende Abschnitt zeigen, während diese im Kapitel 3 in den Rahmen einer konkreten Untersuchung gestellt werden.

2. METHODEN DER GLETSCHERFORSCHUNG

Im folgenden sollen geläufige Techniken zur Erfassung des aktuellen Verhaltens von alpinotypen Gebirgsgletschern insoweit kurz vorgestellt werden, als sie für eine Bewertung der Stellung kartographischer Hilfsmittel im Gesamtkontext eines Untersuchungsablaufs von Bedeutung sind. Die Reihung trifft nur eingeschränkt eine Aussage über Exaktheit und „zeitgemäße Qualität" einer Methode, einerseits ist auf Grund der vielfältigen Fehlerquellen eine wechselseitige Validierung durch verschieden konzipierte Untersuchungen nahezu unerläßlich, und außerdem richtet sich das jeweilige Vorgehen vielfach auch nach gegebenen Voraussetzungen wie etwa Datenverfügbarkeit, gesteckter Zeitrahmen, finanzieller Aufwand und Zugänglichkeit des Untersuchungsgebiets.

Erfassung des Gletscherverhaltens

Zur Entwicklung von Theorien und Modellen zur Erklärung und Vorhersage künftiger Entwicklungen ist zunächst eine Erfassung des Verhaltens über einen bestimmten

Zeitraum erforderlich. Mit derartigen Datenreihen kann erst die Beziehung zu möglichen steuernden Eingangsgrößen hergestellt und dann beurteilt werden. Diese mehrmalige Beurteilung des „Ernährungszustandes" eines Gletschers kann von einer visuellen Beurteilung über Längen- und Flächenmessungen bis zu volumetrischer Bestimmung reichen und erfordert häufig einen beträchtlichen Aufwand, weshalb gerade dieser Bereich Ziel von Rationalisierungsmaßnahmen ist, die entweder auf bereits gemachten Erfahrungen und bestätigten Zusammenhängen oder aber auf dem Einsatz moderner Technologie beruhen.

2.1. Qualitative Methoden

Diese setzen ein bei der Auswertung historischer Quellen über Almwirtschaft, Bergbau und bei vom Gletscher verursachten Katastrophen wie etwa Seeausbrüchen. Aus der „heroischen Phase des Alpinismus" gibt es eine große Anzahl exakt gearbeiteter Gemälde, die ebenso wie erste gebirgskartographische Produkte erstaunlich große Übereinstimmung mit landschaftlichen Indizien von Gletscherständen zeigen. Besonders wichtig sind erste photographische Aufnahmen, die speziell bei Beibehaltung des Kamerastandpunktes eindrucksvolle Vergleiche liefern (Bild 1 und 2). Gerade diese Methode des Photovergleichs ist auch heute noch von großer Bedeutung, da sie nicht nur Umfang und Höhe der Eismasse anzeigt, sondern auch Auskunft über den für den Energiehaushalt wichtigen Oberflächenzustand (Albedo!) gibt. Hier wird von der Computertechnik eine Brücke zu den quantitativ exakt auswertbaren Verfahren geschlagen, da nunmehr auch konventionelle Amateuraufnahmen ohne Verwendung einer Meßkammer einer quantitativen Auswertung zugänglich werden.

2.2. Quantitative Methoden

Erst Meßdaten auf metrischem Niveau ermöglichen exakte Vergleiche und vor allem korrelative Zusammenhangsmessung mit möglichen Prädiktoren des Gletscherverhaltens. Das bei weitem einfachste Maß ist die Veränderung der Position des Zungenendes. Darin gehen aber eine Anzahl topographischer Charakteristika implizit ein, die nur schwer zu eliminieren sind und somit Vergleiche wesentlich erschweren. Das einzige Maß, das nur vom derzeitigen Zustand der Gletscher und der Jahreswitterung abhängig ist (und nicht von einer ganzen Sequenz vorheriger Reaktionen) ist die spezifische Massenbilanz (relativiert auf eine Flächeneinheit). Nur diese Größe läßt von Jahr zu Jahr eine Aussage über den Einfluß der Witterung zu, für Vergleichszwecke muß aber weiter auf bestimmte Höhenstufen relativiert werden, um den unterschiedlichen Gleichgewichtszustand verschiedener Gletscher zu eliminieren. Zur Bestimmung der Massenbilanz stehen drei Methoden zur Verfügung, die nachfolgend kurz vorgestellt werden sollen.

3. METHODEN DER MASSENBILANZBESTIMMUNG UND IHRE ERGEBNISSE BEI DREI GLETSCHERN DER GOLDBERGGRUPPE

3.1. Die direkte glaziologische Methode

Obwohl der Hauptteil dieser Arbeit, als Anwendungsbeispiel von Kartographie und Kartometrie, naturgemäß der geodätischen Methode gewidmet ist (siehe Kapitel 3.3), sei vorerst die zwar aufwendigste (im Hinblick auf die notwendigen Feldarbeiten),

Bild 1 (oben) und Bild 2 (unten): Wurtenkees 17. 9. 1896 und 17. 9. 1982. Beide Bilder wurden vom selben Standort aufgenommen.

aber dafür exakteste und den detailliertesten Einblick in die physikalischen Wirkungsmechanismen der Gletscherschwankungen gewährende direkte glaziologische Methode der Massenbilanzbestimmung beschrieben. Mit Hilfe dieser Methode, die auf einem der drei hier behandelten Gletscher seit zwei Jahren durchgeführt wird, wird zum Schluß dieser Abhandlung ein Erklärungsversuch des sehr unterschiedlichen Verhaltens der Gletscher unternommen.

Zur Erfassung des Massenhaushalts werden in den beiden Gletscherzonen, dem Akkumulationsgebiet (wo die Einnahmen in Form von Schneefall, Lawinenablagerung, windverfrachteten Schnee, Reifbildung usw. die Ausgaben überwiegen) und dem Ablationsgebiet (wo die Verluste durch Schmelzen und Abfluß, Verdunstung, Winddrift, Kalbung etc. die Gewinne übertreffen) unterschiedliche Arbeitsweisen angewandt.

Zum Ende des natürlichen Haushaltsjahres (je nach aktueller Witterung zu verschiedenen Zeitpunkten) oder zum fixen Datum 30. September werden im Akkumulationsgebiet in der Variabilität des Geländes angepaßter Dichte (siehe dazu H. HOINKES, 1970) Schneeschächte in den Altschnee des aktuellen Haushaltsjahres gegraben. Der Vorjahreshorizont sollte womöglich durch Farbmarkierungen, Pegel o. ä. markiert sein um Fehlmessungen in den Firn früherer Jahre hinein zu vermeiden. In den Schächten werden die Stratigraphie und der Dichteverlauf in der Vertikalen bestimmt und dann durch Summation für jeden Schneeschacht der Wasserwert der Schneeschicht, also der punktuelle Jahresbilanzwert b_a erhalten. Bei der Integration der b_a-Werte über die Gesamtfläche des Akkumulationsgebietes (also bis zur Gleichgewichtslinie des Gletschers) wird wieder die Karte als wichtiges Hilfsmittel benutzt. Eine möglichst große Anzahl von Schneekartierungen mit den typischen „Schichtogivenmustern" helfen bei der Interpolation zur Gewinnung der Isolinien gleicher Massenbilanz, die dann entweder planimetriert werden oder das Bilanzvolumen im Akkumulationsgebiet mit Hilfe eines Geländemodells und verschiedenen Korrelationen mit Neigung, Bombierung, Exposition etc. (nähere Erklärung bei G. J. YOUNG, 1976) bestimmt wird.

Unterhalb der Gleichgewichtslinie, im Ablationsgebiet, werden die jährlichen Verlustbeträge durch ein Netz von ins Eis gebohrten Ablationspegeln gemessen. Die Interpolation erfolgt analog zur Vorgangsweise im Akkumulationsgebiet, wobei die Ablationsmuster hier speziell in gletschergünstigen Jahren mit Firn und Altschnee in den unteren Gletscherregionen entstehen. Beim Einbohren der Pegel muß eine Fläche dotiert werden, die weit über die durchschnittliche Höhe der Gleichgewichtslinie hinaufreicht, um auch in Extremjahren (wie z. B. nach den letzten beiden Sommern) auch in höhergelegenen Gletscherteilen Massenbilanzwerte zu erhalten. Gletscher wie die in der Sonnblickgruppe benötigen Ablationspegel bis in Gipfelniveau, das in sehr schönen Bergsommern von der Gleichgewichtslinie überschritten wird.

Das Ergebnis der Feldarbeiten ist eine Kartendarstellung der Jahresmassenbilanz, wie sie als Beispiel in der Tafel I für den Schareckteil des Wurtenkeeses dargestellt ist. Die Karte zeigt die Jahresbilanz dieses Gletschers im gletscherungünstigen Jahr 1982/83 mit beinahe auf der gesamten Gletscherfläche negativen Bilanzwerten bis über $-300\ g/cm^2$ auf der Zunge und auch fast durchgehend Bilanzen zwischen -50 und $-150\ g/cm^2$ ($1\ g/cm^2 = 1$ cm Wasseräquivalent) im Akkumulationsgebiet eines Normaljahres. Genauer eingegangen auf die Besonderheiten der Mas-

senbilanz dieses Gletschers wird im Kapitel 5 bei den Erklärungsversuchen des abweichenden Verhaltens des Wurtenkeeses zur Mehrheit der anderen Alpengletscher und auch zu den unmittelbar benachbarten der Goldberggruppe. Wie auch dort gezeigt, kann eine Bilanzierung nicht nur zum Zeitpunkt Ende September vorgenommen werden, sondern es ergeben sich auch interessante Aspekte, wenn eine Winterbilanz erstellt wird, also im wesentlichen eine Quantifizierung der Akkumulationsprozesse während der Monate Oktober bis April. Infolge der großen Schwierigkeiten bei den Feldmessungen zum Zeitpunkt April/Mai im Hochgebirge werden derartige Winterbilanzierungen selten durchgeführt, obwohl sich, wie im Kapitel 5 dargestellt, durchaus wichtige Schlußfolgerungen aus ihnen ziehen lassen.

Detailliertere allgemeine Beschreibungen der Methode mit hier nicht behandelten Problemen wie etwa der Vertikalgeschwindigkeit im Gletscher, dem superimposed ice sowie von Möglichkeiten der indirekten Massenbilanzbestimmung mit Hilfe guter Korrelationen mit der Höhe der Gleichgewichtslinie oder dem Flächenverhältnis der herbstlichen Akkumulations- zur Ablationsfläche usw. findet man bei H. HOINKES, 1970, W. S. B. PATERSON, 1981, M. F. MEIER, 1967, F. WILHELM, 1975 und anderen.

3.2. Die hydrologisch-meteorologische Methode

Diese Methode versucht eine Input-Output Rechnung der jährlich durch ein Einzugsgebiet durchgesetzten Wassermassen. Die übliche Wasserhaushaltsgleichung

$$N-A-V = R-B$$

mit einer Gleichsetzung des um Abfluß (A) und Verdunstung (V) verminderten Gebietsniederschlags (N) mit der Differenz von Rücklage (R) und Aufbrauch (B), d. h. der Jahresbilanz, wird auf ein Gletschergebiet angewandt und postuliert, daß die in den rechten Term der Gleichung eingehende Speicherinhaltsveränderung nur die Gletschermassen selbst betrifft.

So präzise sich diese Relationen theoretisch formulieren lassen, so schwierig ist die praktische Erfassung der einzelnen Teilgrößen. Schon die Niederschlagsfeststellung unterliegt im Hochgebirge bisher kaum überwundenen Schwierigkeiten, die Verdunstungsabschätzung ist häufig mangelhaft (zu viele unbekannte Steuergrößen) und die Abflußmessung ist ein aufwendiges Unternehmen. Daraus ergibt sich der Umstand, daß eher sinnvoll Bilanzgrößen der linken Seite aus der anderweitig festgestellten Differenz der rechtsseitigen Elemente abgeschätzt werden. Zusätzlich erschweren auch die sehr unterschiedlichen Größenordnungen von z. B. Niederschlag und Verdunstung deren genügend präzise Behandlung.

Im vorliegenden Untersuchungsgebiet der zentralen Goldberggruppe wurde diese Methode aus verschiedenen Gründen auch nicht zu Vergleichszwecken angewandt. Die Abflüsse von Wurtenkees und Kleinem Fleißkees sind zwar sehr hochgelegen durch Einrichtungen der Energiewirtschaft gefaßt, böten also ausgezeichnete Voraussetzungen für eine gute Abflußaufzeichnung, doch werden die Gebietsabflüsse der einzelnen Einzugsgebiete nach Auskunft der zuständigen Institution nicht getrennt erfaßt (!). Auch aus dem Pegel etwa des Hochwurtenspeichers und der Entnahme aus diesem läßt sich der Zufluß nicht errechnen, da dieser See durch einen ebenen Freispiegelstollen mit einem zweiten kommuniziert und kein Durchfluß gemessen wird.

Somit besteht hier keine Ansatzmöglichkeit für ein Durchrechnen der räumlichen Massentransfers nach hydrologischen Prinzipien.

Für die kommenden Jahre ist eine Pegelstation am Abfluß des Goldberggletschers geplant, um doch auch diese Seite des klimatischen Regimes in einem derart gut untersuchten Hochgebirgsabschnitt erfassen zu können. Eine günstige Erledigung dahingehender Pläne ist jedenfalls sehr zu hoffen.

Andere hydrologische Forschungen beziehen sich auf einen großen Arbeitsmaßstab und interessieren sich für Charakteristika und Differenzierungen innerhalb eines gegebenen Einzugsgebietes. Ein Schwerpunkt dieser Arbeiten sind die Untersuchungen von H. OERTER und vielen anderen am Vernagtferner. Dabei steht die wesentlich höherrangige hydrologische Fragestellung nach dem täglichen und jährlichen Verlauf der Abflußganglinien im Vordergrund, die ja für jegliche Planungen in den betroffenen Räumen von größter Bedeutung sind. Erschwert wird die Untersuchung dieses Phänomens dadurch, daß das Wasser nicht wie in anderen Einzugsgebieten zum Zeitpunkt des Niederschlags oder der Schneeschmelze auch für den Abfluß zur Verfügung steht. Strahlungsgewinn oder sonstige Energiezufuhr wirken sich also nicht unmittelbar im Hydrographen aus. Die Verzögerung wird durch langsame Sickervorgänge in Schnee und Eis, durch die Speicherung freien Wassers in Schneeporen und Eishohlräumen und auch durch energetisch gesteuerte Prozesse wie etwa die Regelation bereits geschmolzener Massen verursacht. Diese teilweise Substituierbarkeit von Massen- und Energieaustausch kompliziert derartige Untersuchungen enorm, wie auch die mehrfachen Speichermöglichkeiten zu sehr komplizierten Modellstrukturen bei Berechnungsansätzen führen.

Ebenso wie Energiehaushaltsmessungen und Abschätzungen des freien Wassergehalts einer Schneedecke (etwa W. AMBACH, 1965) und radioisotopische Untersuchungen Ausgangspunkte für die oben zitierte sehr komplexe, jedoch auch anwendungsnahe Modellierung der Abflußganglinien waren, werden heute andere Charakteristika von Schnee- und Eismassen erfaßt, um deren Stellung im Gesamtablauf künftig besser zu verstehen. Gletscher sind ja bekanntlich nicht nur Wasser-, sondern auch Informationsspeicher verschiedenster, z. B. chemisch meßbarer Zustände. So ist etwa die im Frühjahr 1983 erfolgte Aciditätsanalyse verschiedener Schneestraten im Gesamtbild heutiger Umweltprobleme sicherlich nicht als „akademisches" Sammeln hydrologischer Daten zu sehen.

Bei der umfassenden Analyse eines Gletscherhaushaltes sind demnach keineswegs nur die Massen- bzw. die diese steuernden energetischen Verschiebungen zu betrachten, sondern es sind im Langzeitspeicher Gletscher außer Schnee und Eis eine ganze Reihe bedeutender Informationen vorhanden, die einen dazu veranlassen, die unbezweifelte Interaktion Gletscher – Klima auf breitester Basis zu untersuchen.

3.3. Die geodätische Methode zur Massenbilanzbestimmung

Ursprünglich standen Geodäsie und Kartographie eher untergeordnet im Dienste der Gletscherforschung. Primär waren Karten der Eisflächen für alle auf diesen ausgeführten Forschungsvorhaben von Bedeutung, im Vordergrund lag dabei die Erfassung von Flächen und die exakte Lokalisation von Punkten, ohne verläßliche topographische Grundkarte sind kaum sinnvolle glaziologische Arbeiten durchführbar. Da Gletscher bekanntlich ihre Oberfläche relativ rasch verändern können, sind Aufnah-

men für derartige Karten wiederholt durchzuführen, um einen möglichst aktuellen Stand zur Verfügung zu haben. In den letzten Jahrzehnten konnte die Genauigkeit photogrammetrischer Techniken enorm verbessert werden und man gelangte damit zur Erfassung auch geringfügiger Veränderungen der Oberfläche.

Damit wurde die Frage aktuell, ob man nicht die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Karten zu einer kartometrischen Feststellung der in der Zwischenzeit aufgetretenen Änderungen verwenden könnte. Als interessierende Größen kommen dazu (mittlere) Höhen-, Flächen- und Volumsab- und -zunahmen in Frage. Der als Photogrammeter und Geodät die wiederholte Aufnahme mehrerer Ostalpengletscher durchführende R. FINSTERWALDER war an so einer systematischen Auswertung des geodätischen und topographischen Datenmaterials besonders interessiert, um daraus zahlenmäßige Angaben über Gletscherschwankungen zu gewinnen. In einer Reihe von Arbeiten (1953, 1976 und 1980) stellte er eine Methodik zu einer darauf gerichteten Auswertung der Daten vor.

Diese Techniken wurden allgemein übernommen und dienen verbreitet einer Kontrolle und Prüfung der mit anderen Verfahren erlangten glaziologischen Meßergebnisse (z. B. H. LANG – G. PATZELT, 1971). Im Prinzip beruht diese Methode auf einem Übereinanderlegen der Isohypsenpläne verschiedener Gletscherstände und dem Vergleich des unterschiedlichen Verlaufs der Schichtenlinie. Die Differenzenflächen zwischen den gleichen Isohypsen zu verschiedenen Zeitpunkten ($\Delta F1$ und $\Delta F2$ für obere bzw. untere Zonenbegrenzung) sowie den unterschiedlichen Gletscherumrissen werden erfaßt, ebenso die jeweiligen absoluten Flächen der einzelnen Höhenzonen (F1 und F2 – Flächen zu 2 Aufnahmezeitpunkten).

Setzt man Δh für den (Höhen-)Abstand der die bearbeitete Zone begrenzenden Isohypsen, so erhält man für jede dieser Gletscherzonen die mittlere Höhenänderung mit:

$$dh = \frac{\Delta F1 + \Delta F2}{F1 + F2} \cdot \Delta h$$

Die Volumensänderung kann als

$$dV = dh \cdot \frac{F1 + F2}{2}$$

ausgedrückt werden, setzt man für dh die erste Gleichung ein, erhält man

$$dV = \frac{\Delta F1 + \Delta F2}{2} \cdot \Delta h$$

(Formeln nach H. LANG – G. PATZELT, 1971). Problematisch kann dabei der Bearbeitungsmodus für Bereiche außerhalb der kleineren Gletscherausdehnung werden, für die man meist ein lineares Änderungsverhalten im beobachteten Zeitraum postuliert. Ebenso ergeben sich aus dem Umstand Schwierigkeiten, daß photogrammetrische Aufnahmen kaum zwischen der eigentlichen Gletscherfläche und angrenzenden Firnflecken oder -schürzen unterscheiden, eine „glaziologische Bearbeitung" des in die Auswertung eingehenden Materials aber jedenfalls ein subjektives Moment einbringt.

Sofern sich in dem erfaßten Zeitraum kein signifikanter Tendenzwendepunkt befindet, wird es sinnvoll sein, für Vergleich und Veranschaulichung die mittlere jährliche

Höhen-, Flächen- und Volumsänderung nach Zonen bzw. für die gesamte Gletscherfläche zu bestimmen. Um diese Volumsdifferenz dann mit den glaziologisch festgestellten Werten der Nettobilanz vergleichen zu können, sind Annahmen zur jeweiligen Dichte erforderlich. Diese Umrechnungen sind jedenfalls für Eis im Ablationsgebiet exakter als für Firn von nicht so homogener Dichte im Akkumulationsgebiet.

Abgesehen von der rein photogrammetrisch möglichen Arbeitsgenauigkeit (die je nach Durchzeichnung in Gebieten hoher Albedo variiert), sprechen andere Gründe dagegen, diese geodätische Methode zur jährlichen Massenhaushaltsbestimmung anzuwenden. Einerseits sind eben größere Differenzen exakter zu bestimmen, dann wechseln aber auch der Ausaperungszustand und die jeweilige Rücklage bzw. deren Dichte in Relation zur einjährig möglichen Schwankung zu rasch, um noch genügende Exaktheit bei Aussagen über Massenänderungen erzielen zu können. Deshalb wird diese Methode vorwiegend auf Intervalle in der Jahrzehnt-Dimension angesetzt, die sich nach den auch für sonstige Arbeiten notwendigen Neuaufnahmen der Oberfläche richten. Damit läßt sich dann eine gute Bewertung der in der Zwischenzeit abgelaufenen Volumsveränderungen erzielen, ebenso eine Prüfung der Summe der jährlich gemessenen Massenbilanzen, wie auch eventuell ein Auffüllen von Datenlücken.

Obwohl die Bearbeitung nach Höhenzonen dazu verleiten könnte, dürfen keine unmittelbaren Aussagen über das Höhen- und Volumsverhalten einzelner Teilbereiche eines Gletschers gemacht werden. Dabei spielt ja bekanntlich noch das Fließverhalten des Eises mit vertikaler und horizontaler Komponente mit. Erst wenn die Submergenz und Emergenzbewegungen zur Genüge aus anderen Messungen bekannt sind, können sie auch von den massenbedingten Änderungen der Aufhöhung getrennt werden. Die enge Verflechtung von Massenzuwachs bzw. -verlust und dem Verhalten der Fließgeschwindigkeit macht diese Unterscheidung der Ursachen keinesfalls leichter, besonders da hier auch Schwellenwerte für das Fließverhalten eine enorme Rolle spielen können, wie etwa beim Phänomen der „Surges" („Ausfließen" eines Gletschers) zu beobachten ist. Jedenfalls aber summieren sich die Änderungen der Volumina zu einem für den Gesamtgletscher gültigen Wert, da im Mittel über diesen Submergenz und Emergenz einander die Waage halten müssen. Stimmen diese Globalwerte mit denen der glaziologischen Massenbilanzanalyse gut überein, so kann diese nach Zonen subtrahiert und daraus die Vertikalbewegung abgeschätzt werden. Damit soll nur angedeutet werden, daß die potentiellen Leistungen der geodätischen Methodologie für die Gletscherforschung über eine reine Datenprüfung der glaziologischen Methode hinausgehen können und zu einer wertvollen Ergänzung im Rahmen einer Gesamtanalyse werden. Die hier besprochenen unterschiedlichen „Methoden" der Massenbilanzanalyse sind also keineswegs reine Alternativen, sondern entfalten erst im Zuge einer integrativen Anwendung ihre volle Leistungsfähigkeit.

Längenmessungen:

Wie bereits erwähnt, bietet die Messung des Vorstoßes bzw. Rückzuges der Gletscherzungen eine erste einfache Möglichkeit zur Quantifizierung des Gletscherverhaltens, wenn dieses dadurch auch in seiner Komplexität nicht genau erfaßt werden kann (siehe Abbildung 1).

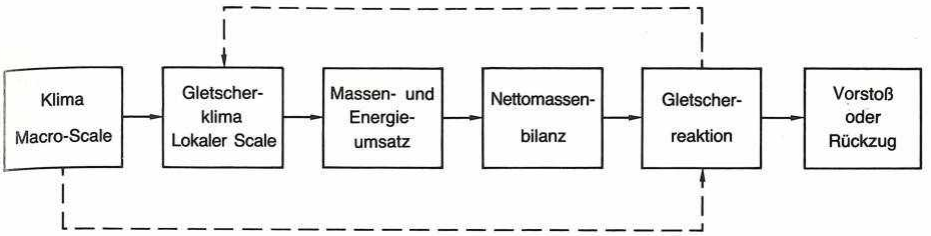


Abbildung 1: Wirkungsdiagramm der Beziehungen Klima–Gletscher (nach PATERSON)

Diese Messungen werden vom Alpenverein seit dem Ende des 19. Jahrhunderts auf Anregung von E. RICHTER und Sebastian FINSTENWALDER für eine große Anzahl von Gletschern durchgeführt. In Abbildung 2 ist das Verhalten der Gletscherzungen in den österreichischen Alpen dargestellt. Der Vorteil der Methode liegt in ihrer Einfachheit und dem geringen zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand, der es erlaubt, die Messungen regelmäßig und relativ häufig durchzuführen. Als Nachteil dieser Methode muß allerdings auch erwähnt werden, daß das eindimensionale Verhalten der Gletscherzunge längs ihrer Längsachse (Vorstoß-Rückzug) erst die Resultierende der im einzelnen komplizierten Wirkungskette Klima-Wetter-Wärmehaushalt der Gletscheroberfläche und des Gletscheruntergrundes – Thermodynamik und Massenhaushalt des Eiskörpers – Orographie des Untergrundes – Fließbewegung (Dynamik) – Vorstoß/Rückzug des Zungenendes darstellt und keineswegs aus dem Verhalten des Zungenendes allein auf die anderen Größen, speziell den am meisten interessierenden Massenhaushalt, geschlossen werden kann (vergleiche Abbildung 1).

Im Sonnblickgebiet in der Zentralen Goldberggruppe (siehe Abbildung 3) wurden die ersten Gletschermeßmarken im Jahr 1896 durch F. MACHACEK angelegt, die seither am häufigsten und regelmäßigsten für die drei Hauptgletscher der Gruppe nachvermessen wurden.

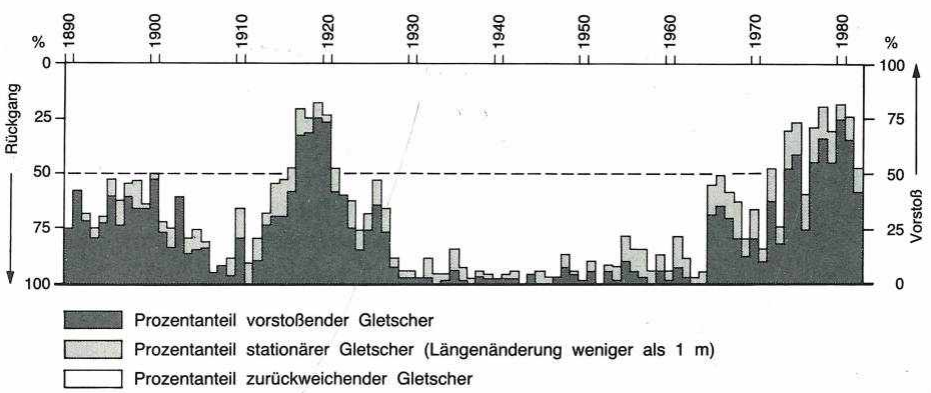


Abbildung 2: Das Verhalten der Gletscherzungen in den österreichischen Alpen seit Beginn der AV-Längenmessungen (nach G. PATZELT, 1976, 1983)

In der Abbildung 4 sind deren Längenänderungen graphisch dargestellt. Der Zeitraum 1850 bis 1896 wurde in Ermangelung jeglicher Meßdaten unter Zuhilfenahme von Photos beziehungsweise Karten interpoliert. Bei den Längenänderungsangaben handelt es sich um Horizontalprojektionen; dies bedeutet, daß die Längenänderungen mit dem Cosinus der jeweiligen Geländeneigung multipliziert wurden, in Wirklichkeit also noch größere Rückzugsbeträge auftraten, als sie im Diagramm dargestellt sind.

Im Vergleich dazu sind in den Abbildungen 5a bis 5d die Zahl der Tage mit Schneefall für die Monate Mai bis September sowie die Verhältnisse der sommerlichen Niederschlagsmenge, der Sommermittel der Lufttemperaturen (Mai bis September) und der Sonnenscheindauer angegeben. Es ist nämlich bewiesen, daß weniger

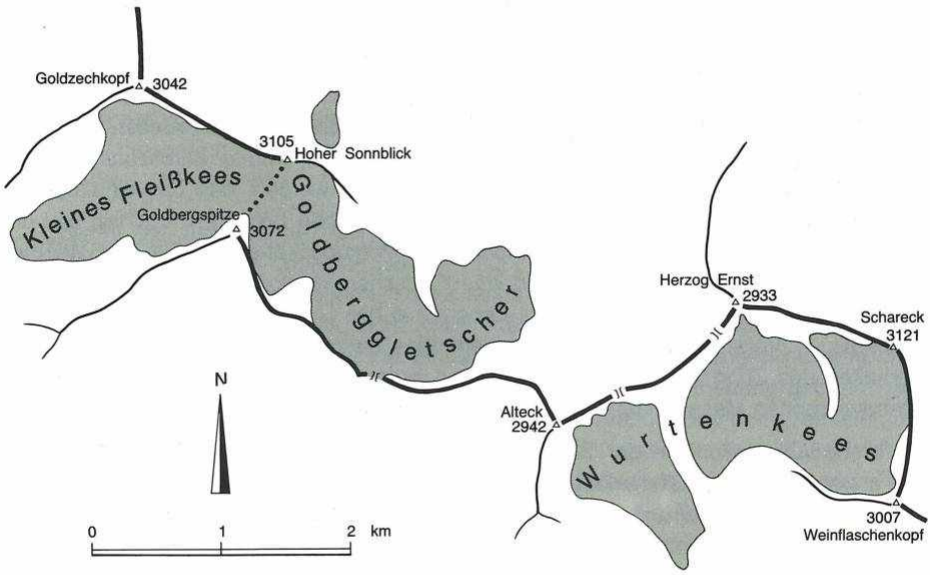


Abbildung 3: Kammverlaufskizze der zentralen Goldberggruppe

die Witterung als vielmehr das Wettergeschehen im Sommer die Haushaltssituation von Gletschern beeinflußt. Dabei sind es gerade jene obig angegebenen Klimaparameter, denen die größte Bedeutung zukommt. Es wurden dazu die Registrierungen der meteorologischen Beobachtungsstation auf dem Gipfel des Hohen Sonnblicks herangezogen. In der Darstellung wurde die Methode der übergreifenden Mittel gewählt; die 5jährigen, um kurzfristige Schwankungen zu eliminieren, die 30jährigen zur Veranschaulichung des längerperiodischen Trends.

Seit den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts liegen Registrierungen meteorologischer Elemente vom Hohen Sonnblick vor.

Wie der Vergleich zwischen dem Gletscherverhalten und dem Gang der einzelnen meteorologischen Elemente zeigt, kommt es bei den hier untersuchten Gletschern zwar zu einer Reaktion des Zungenverhaltens auf diverse Klimaparameter, allerdings mit einer gewissen Verzögerung, weiters nur dann, wenn der Trend lange genug

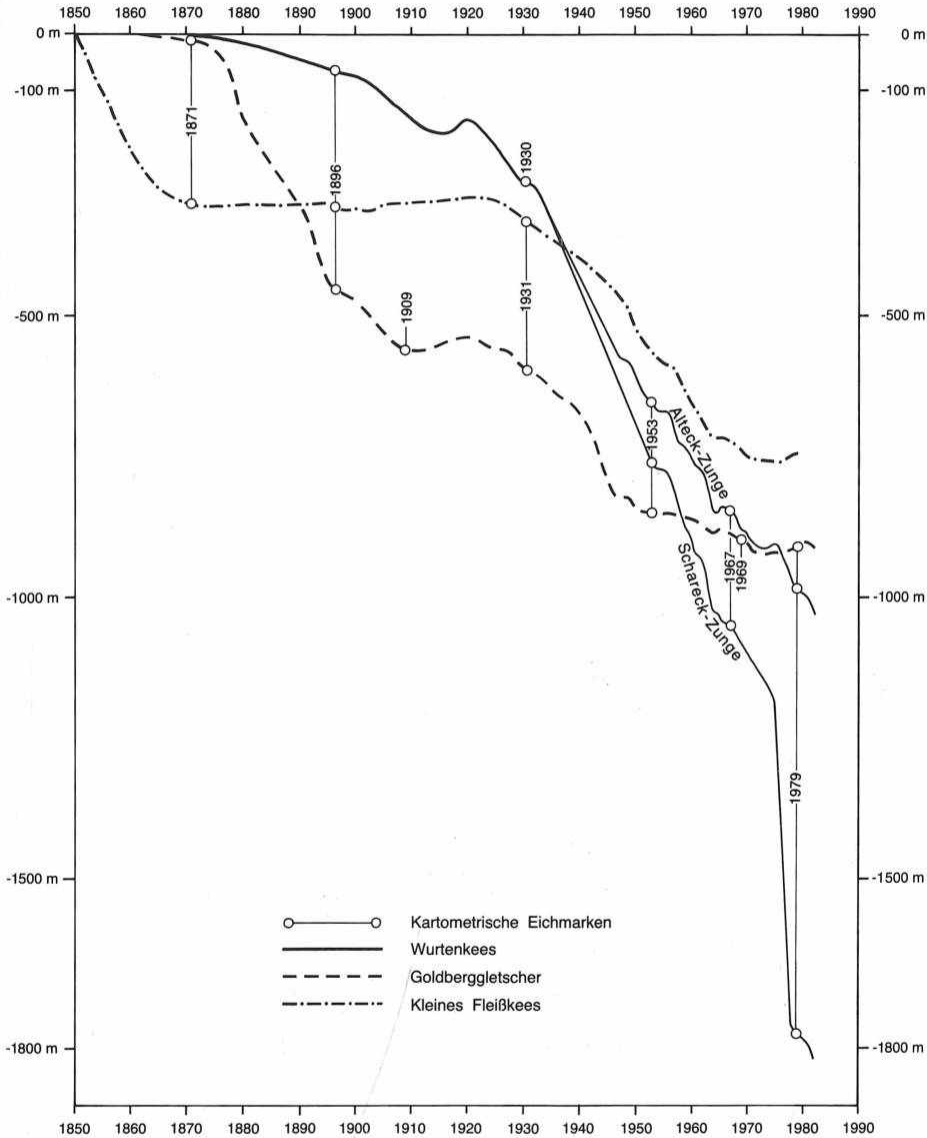


Abbildung 4: Längenänderung der drei Hauptgletscher der zentralen Goldberggruppe seit 1850 (teilw. nach R. BÖHM, 1983)

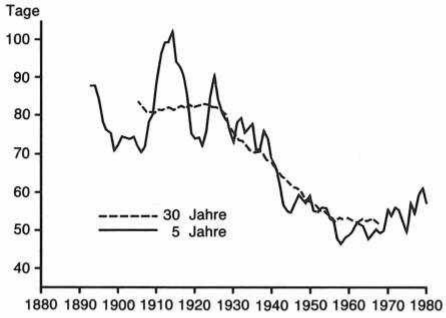


Abb. 5a: Hoher Sonnblick: Zahl der Tage mit Schneefall (Mai bis September).

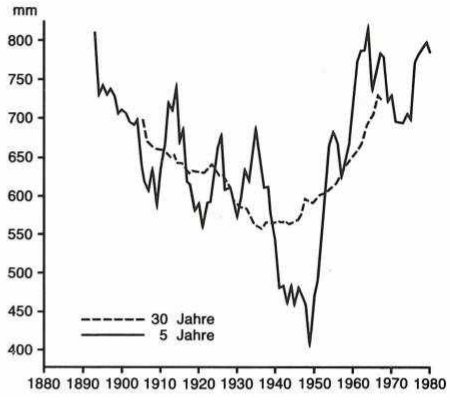


Abb. 5b: Hoher Sonnblick: Sommerniederschlagsmenge in mm (Mai bis September).

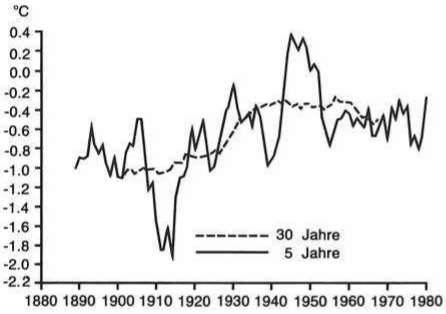


Abb. 5c: Hoher Sonnblick: Sommermitteltemperatur in °C (Mai bis September).

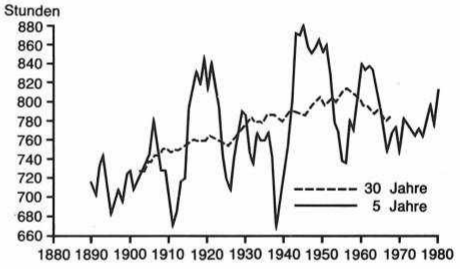


Abb. 5d: Hoher Sonnblick: Zahl der Sonnenscheinstunden (Mai bis September).

Abb. 5e:

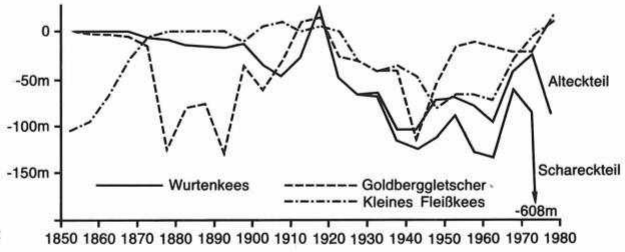


Abbildung 5: Verlauf klimatologischer Parameter auf dem Hohen Sonnblick, dargestellt durch übergreifende Mittelwerte (a–d) sowie Längenänderungsbeträge der drei Hauptgletscher in Fünfjahresschritten (e)

andauert, und die Zunge außerdem nicht im Zusammenbruch begriffen ist sowie an keiner orographischen „Unstetigkeit" liegt. Die Abbildung 6 (a bis c) soll dies noch zusätzlich verdeutlichen.

Obwohl alle drei Gletscher seit 1850 stark zurückgewichen sind, so fällt doch das im Vergleich zum Goldberggletscher und dem Wurtenkees unterschiedliche Verhalten der Zunge des Fleißkeeses auf. Diese hat sich zwischen 1850 und 1870 um mehr als das Zehnfache des Rückzugsbetrages der anderen Gletscher zurückgezogen. Die Fleißzunge reichte nämlich 1850 noch über den untersten Steilabfall bis in eine Seehöhe von etwa 2.250 m hinunter. Durch die allmählich eintretende gletscherungünstige Klimaentwicklung kam es zu einem allgemeinen Gletscherrückgang im Untersuchungsgebiet, der sich beim Kleinen Fleißkees deshalb so drastisch auswirkte, weil dessen Zunge keineswegs „gesund", also aufgewölbt, sondern bereits sehr dünn war, und dadurch eine Abnahme der Eisdicke zu einem überproportional starken Rückgang des Gletschers führte.

Wegen der orographisch bedingten sprunghaften lokalen Dickenzunahme beim Geländeknick – also einer „Quasi-Unstetigkeit" im Gletscherbett – und keiner weiteren Temperaturzunahme bzw. Zunahme des Schneefalls, welche wieder einen Gletschervorstoß hätte bewirken können, kam es solange zu einer Stagnation der Bewegung des Zungenendes, bis die Zunge wiederum auch im flacheren Teil in etwa 2.500 m Seehöhe dünn genug war, um bei einer Dickenabnahme zurückweichen zu können. Ab diesem Zeitpunkt kam es dann zu einem Verhalten des Zungenendes, welches durchaus mit den klimatischen Bedingungen sehr gut übereinstimmt.

Dieselben physikalischen Mechanismen sind auch beim Wurtenkees und beim Goldberggletscher erkennbar. Diese Gletscher wichen bis zum Jahre 1870 nur wenig zurück. Ab diesem Zeitpunkt machte sich das Zurückweichen des Goldberggletschers deutlich bemerkbar, und zwar deshalb, weil dieser Gletscher eine im Verhältnis zum Wurtenkees bereits dünne Gletscherzunge aufgewiesen hatte. Zwar wich die Zunge des Wurtenkeeses auch zurück, aber wegen ihrer Dicke, wie in Abb. 6c deutlich erkennbar, doch wesentlich langsamer. Bei beiden Gletschern ist, bedingt durch gletschergünstige Jahre, im zweiten Dezennium des 20. Jahrhunderts ein geringes Vorstoßen bis 1920 feststellbar. Dabei wurden auch kleine Endmoränen abgelagert. Die um diese Zeit einsetzende Zunahme der Temperatur und der Sonnenscheindauer führte schließlich zu einem weiteren kontinuierlichen Zurückweichen der Zungenenden, dem sich ab etwa 1930 aus bereits erwähnten Gründen auch wieder das Kleine Fleißkees anschloß. Während sich nun aber der Goldberggletscher und das Kleine Fleißkees quasi im Gleichschritt zurückschoben, ging dies beim Wurtenkees ab 1930 viel rascher vor sich, leicht zu begründen mit dem flacheren Zungenende. Beim Wurtenkees begann ab etwa 1940 der Abreißprozeß des Schareckfirnfeldes. Während sich zwischen 1930 und 1953 die Gletscherzunge auf der Alteckseite um 390 m zurückzog, war der Rückzugsbetrag auf der Schareckseite um mehr als 100 m größer.

Um die Mitte dieses Jahrhunderts kam es zu einer gletschergünstigeren Klimaentwicklung, der sich das Zungenverhalten von Kleinem Fleißkees und Goldberggletscher allmählich anglichen. Die Zungen des Schareck- bzw. Alteckgletscherteiles des Wurtenkeeses wichen und weichen weiter kollabierend zurück. Dagegen haben sich die Zungen des Kleinen Fleißkeeses und des Goldberggletschers einigermaßen stabi-

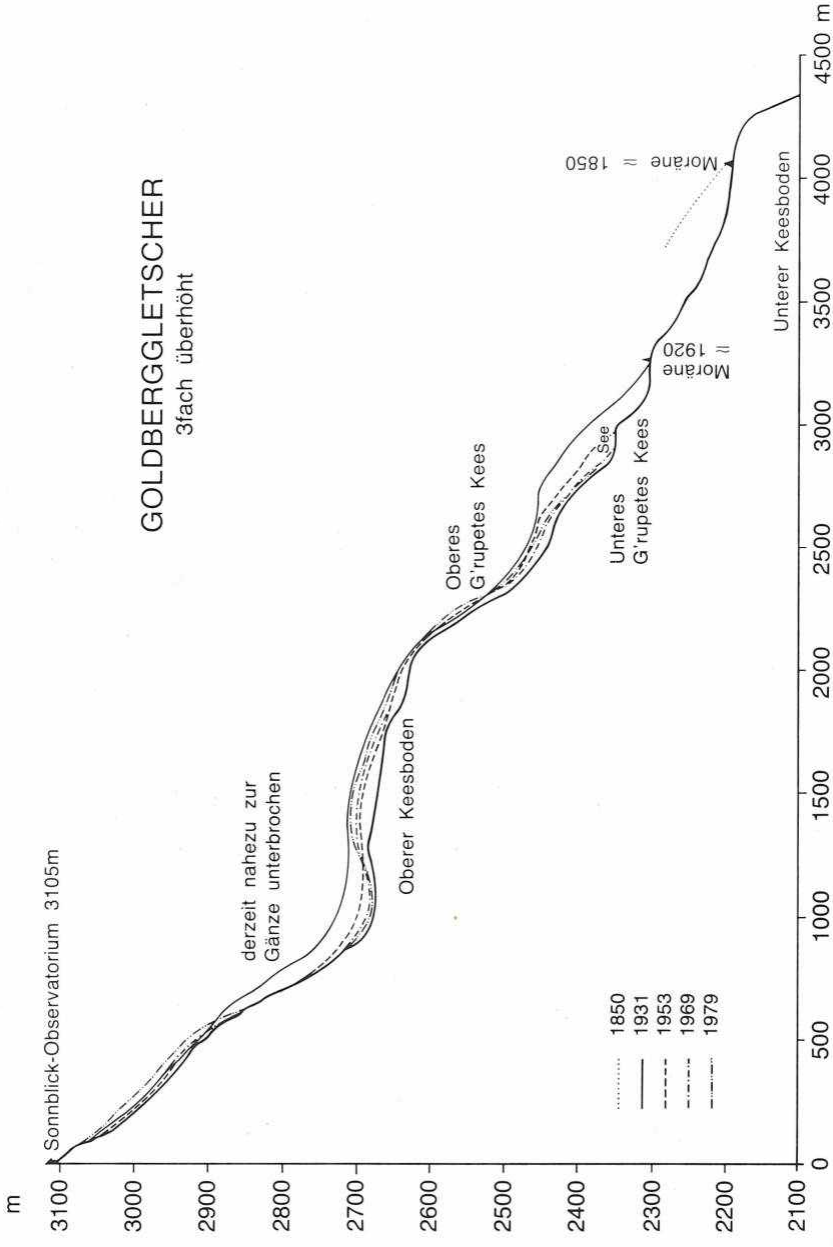


Abbildung 6a: Goldberggletscher: Gletscherlängsprofil 1850–1979

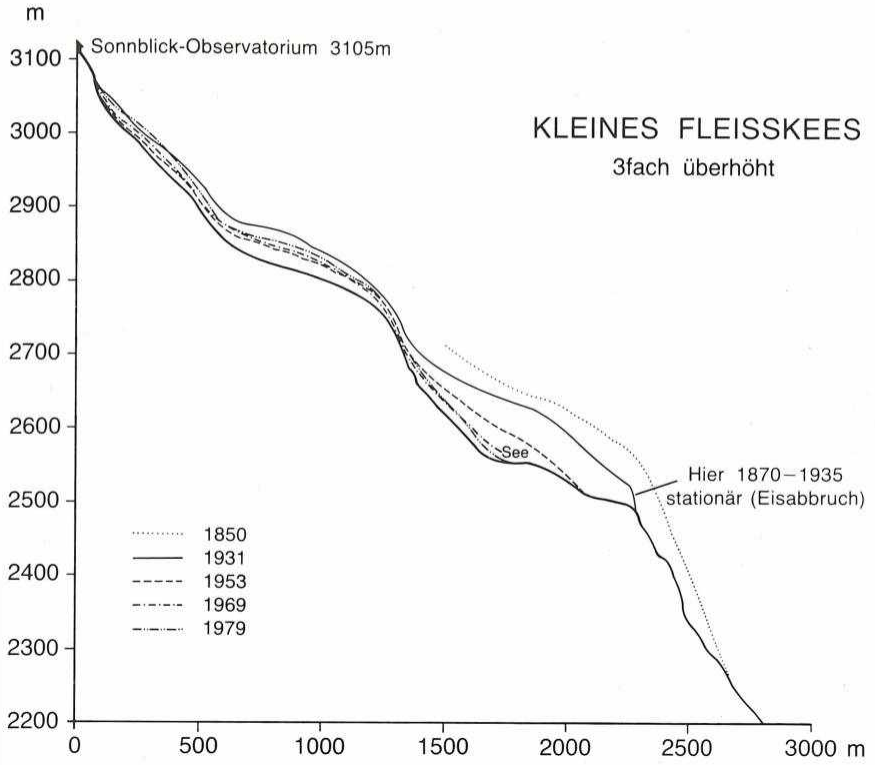


Abbildung 6b: Kleines Fleißkees: Gletscherlängsprofil 1850–1979

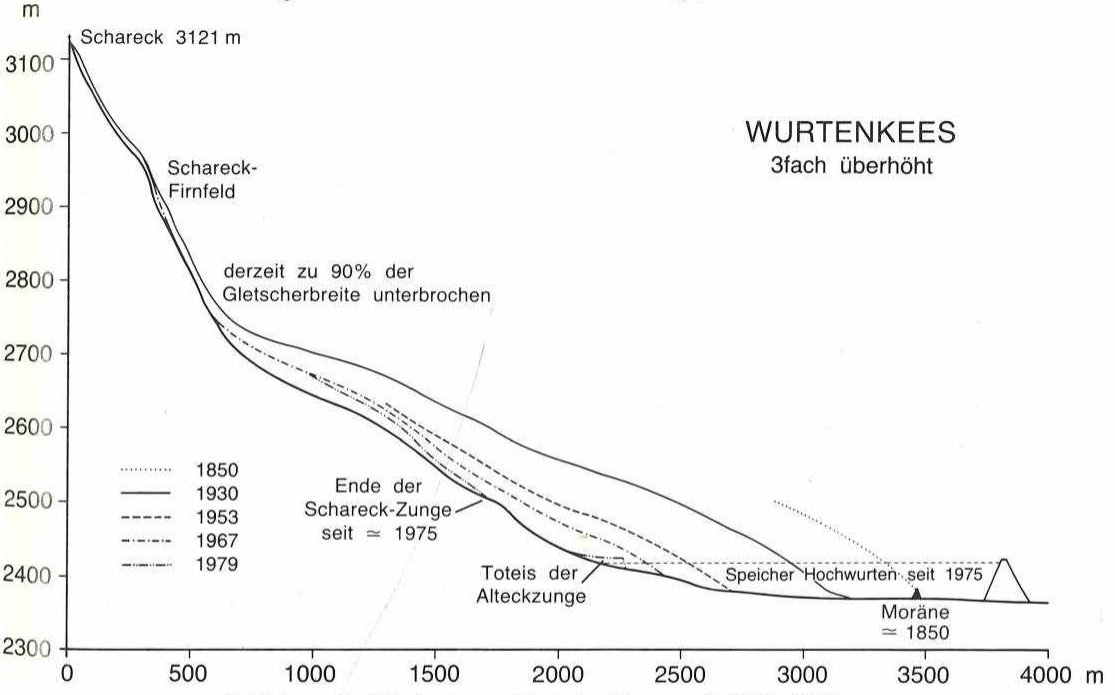


Abbildung 6c: Wurtenkees: Gletscherlängsprofil 1850–1979

lisiert; bei letzterem gibt es einige Anzeichen für einen baldigen Vorstoß. Die beiden Teilgletscher des Wurtenkeeses – der sogenannte Alteck- bzw. Schareckgletscherteil – werden sich in den nächsten Jahren, unter der Voraussetzung, daß keine markante Klimaänderung eintritt, weiterhin stark zurückziehen.

In der Abbildung 5e sind die fünfjährigen Längenänderungsbeträge der drei Gletscher eingetragen. Dabei stellen die einzelnen Flächen zwischen der Nullinie und den Änderungsbeträgen die Verhältnisse der Längenänderungen der einzelnen Gletscher dar. Es lassen sich Perioden stark unterschiedlichen Verhaltens der untersuchten Gletscher von solchen unterscheiden, in denen sich die Längenänderungen zumindest größenordnungsmäßig ähneln. Die Erklärung dafür ist in der bereits erwähnten Tatsache zu finden, daß Vorstoß- bzw. Rückzugstendenzen nicht nur im Klima, sondern auch in der Orographie ihre Begründung haben. Deutlich sichtbar ist der 1920er Vorstoß, der im Vergleich mit der klimatischen Situation (Abbildung 5a–d) mit einer Verzögerung von rund fünf bis zehn Jahren eingetreten ist, und außerdem der kontinuierliche in guter Übereinstimmung mit der Klimaentwicklung anschließende Gletscherrückgang bis zum Jahr 1975. Ab dieser Zeit kam es zu einem Stillstand bzw. sogar leichten Vorstoß der Gletscher mit der schon erwähnten Ausnahme des Wurtenkeeses.

Flächenänderungen:

Ein genaueres Studium der Gletscheränderungen erlauben Kartendarstellungen aus verschiedenen Jahren.

Für die Goldberggruppe stehen für verschiedene Termine von 1871 bis 1979 unterschiedlichste Kartendarstellungen zur Verfügung. Besonders aussagekräftig für Gletscherschwankungen sind Karten, in denen jeweils die Höhenlinien zu zwei Zeitpunkten enthalten sind.

In dieser Arbeit können für die Perioden 1930/31 bis 1953, 1953 bis 1967/69 und 1967/69 bis 1979 Vergleichskarten der drei Hauptgletscher dieser Gebirgsgruppe vorgestellt werden (siehe die Kartenbeilagen).

Über die braunen Höhenlinien der Umgebung und des Gletscheruntergrundes (ermöglicht durch die seismischen Eisdickenmessungen des Instituts für Geophysik der Universität Wien, E. BRÜCKL, O. BITTMANN, 1977) wurden dick blau die Gletscherumrisse und dünn blau die Höhenlinien der Gletscheroberfläche gelegt. Der ältere Termin ist jeweils strichliert, der jüngere durchgehend liniert eingezeichnet. Die blau bzw. rot (verschiedene Farbdichten) gefärbten Flächen zwischen den äquialtituden Höhenlinien der beiden Termine stellen auf sehr anschauliche Art und Weise die positiven bzw. negativen Höhenänderungen, die in verschiedenen Gletscherbereichen sehr unterschiedlich sein können, dar.

Die Hinzufügung der zweiten Dimension in die quantitative Beschreibung der Gletscherschwankungen bestätigt im wesentlichen die bereits bei den Längenmessungen erwähnten Besonderheiten der Gletscher.

Das Wurtenkees wies 1930 eine Fläche von ziemlich genau 3 km² auf, der Goldberggletscher erstreckte sich über 2.245 km², das Kleine Fleißkees über 1.563 km².

Im Zeitraum 1930 bis 1969 nahmen die Flächen des Goldberggletschers und des Kleinen Fleißkeeses, durchaus vergleichbar mit dem Wurtenkees, beträchtlich ab. Der

Tabelle 1: Kartometrische Vergleichsdaten der drei Hauptgletscher der Zentralen Goldberggruppe 1930–1979

	Goldberggletscher			Kleines Fleißkees			Wurtenkees		
	FL	ED	VOL	FL	ED	VOL	FL	ED	VOL
1930/31	2.245	24,4	54,72	1.563	29,3	45,80	3.012	48,3	145,35
1953	1.838	12,2	22,41	1.244	12,5	15,49			
1967/69	1.813	9,8	17,71	1.228	11,7	14,39	2.334	13,6	31,78
1979	1.894	13,2	25,05	1.234	16,1	19,89	2.046	8,4	17,19

Fl: Fläche (in km^2)
ED: mittlere Eisdicke (in m)
VOL: Gletschervolumen (in Millionen m^3)

Relativwerte von Gletscherfläche (FL), mittlerer Eisdicke (ED) und Gletschervolumen (VOL), bezogen auf 1930/31, in Prozent

	Goldberggletscher			Kleines Fleißkees			Wurtenkees		
	FL	ED	VOL	FL	ED	VOL	FL	ED	VOL
1930/31	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1953	81,9	50,0	41,0	79,6	42,7	33,8			
1967/69	80,8	40,2	32,4	78,6	39,9	31,4	77,5	28,2	21,9
1979	84,4	54,1	45,8	79,0	55,0	43,4	67,9	17,4	11,8

Goldberggletscher reduzierte seine Fläche um 19%, das Kleine Fleißkees um 21%. Das Wurtenkees verkleinerte sich – wie die Mehrzahl der übrigen österreichischen Alpengletscher – bis 1967 in bezug zur Fläche 1930 um 23%.

Dagegen kam es in den Jahren 1969 bis 1979 zu einer Flächenzunahme des Goldberggletschers um rund 4%, des Kleinen Fleißkeeses um weniger als 1%; das Wurtenkees verlor abermals fast 10% seiner Fläche von 1930, während die meisten anderen österreichischen Gletscher im betreffenden Zeitraum zumindest stagnierende, meist jedoch steigende Flächentendenz aufwiesen. Speziell der starke Flächenverlust von 0,3 km^2 in den vergangenen 12 Jahren unterstreicht die Ausnahmestellung dieses Gletschers.

Eine quantitative Methode zur Darstellung der Form des Gletschers ergibt sich mit Hilfe der hypsographischen Kurve. Bei ihr sind auf der Ordinate die Höhenstufen, auf der Abszisse die entsprechenden Flächenanteile aufgetragen, wobei die hypsographische Kurve dann als Summenkurve die zu entsprechenden Höhenintervallen gehörigen Flächenanteile verbindet.

In bezug auf die Flächen der drei Gletscher in den verschiedenen Höhenstufen ergibt sich folgendes Bild (siehe Abbildung 7)

1930/31 wies der Goldberggletscher in der Höhenstufe zwischen 2.700 und 2.750 m sein spitzes Flächenmaximum auf. Dieses verlagerte sich, bedingt durch den Gletscherrückgang, bis zum Jahr 1953 auf die Höhenstufe 2.650 bis 2.700 m, wo es auch heute noch liegt. Das sekundäre Maximum in 2.450 bis 2.500 m verflachte sich bis 1979 zusehends. In den höhergelegenen Gletscherteilen von über 2.800 m kam

es nur zwischen 1930/31 und 1953 zu einer Flächenabnahme; ab diesem Zeitpunkt blieb die Fläche dort ziemlich gleich.

Wie der Goldberggletscher weist auch das Kleine Fleißkees zwei Maxima auf, wobei das Hauptmaximum in 2.600 bis 2.650 m liegt. Während dieses – orographisch bedingt – trotz der Flächenabnahme nach wie vor sehr ausgeprägt in Erscheinung tritt, hat sich das Nebenmaximum auch hier stark verflacht.

Das Wurtenkees hatte 1930 seine größte Ausdehnung zwischen 2.550 und 2.800 m mit dem Maximum bei 2.650 bis 2.700 m Seehöhe. Zwischen 2.550 und 2.900 m traten bis 1967 die größten Flächenverluste auf. Während ab diesem Zeitpunkt bis 1979 die Gletscherfläche zwischen 2.700 m Seehöhe und dem Gipfel ziemlich gleich blieb, nahm sie im tieferen Gletscherbereich weiterhin rapide ab, in dem Zeitraum also, wo im Gegensatz dazu bei den zwei restlichen Gletschern nur geringfügige Flächenänderungen registriert wurden.

Da sich die Gletscher in ihrer Vertikalerstreckung und in der absoluten Flächenausdehnung zum Teil erheblich unterscheiden können, sind sie anhand der einzelnen hypsographischen Kurven nicht unmittelbar miteinander zu vergleichen.

Die normierten hypsographischen Kurven, bei denen die Untergrenzen zu null gesetzt und die Stufen in relativen Höhen angegeben werden, ermöglichen jedoch diesen Vergleich.

Geht man noch einen Schritt weiter und untergliedert man die gesamte Vertikalerstreckung eines Gletschers in zehn gleiche Teile, so erhält man die sogenannte Normalkurve eines Gletschers. Diese gibt anschaulich die Flächenverteilung in den einzelnen Höhenstufen bei unterschiedlichen Gletschern an (siehe Abbildung 7).

Die Normalkurven von Goldberggletscher und Kleinem Fleißkees stellen den Talgletschertypus dar mit einem ausgeprägten Maximum, welches – je nach Entwicklung von Zunge und Firngebiet – zwischen verschiedenen Höhenintervallen variieren kann. Bei beiden Gletschern ist es deshalb zu einer Verlagerung der Maxima in tiefere Höhenbereiche gekommen, weil wegen des Gletscherrückzuges in gleicher Seehöhe gelegene Gletschergebiete nun einer anderen Höhenklasse zugeordnet werden.

Das Wurtenkees mit seinem einigermaßen symmetrischen Verlauf stellt dagegen eher den Kargletschertypus dar.

Eisdicken, Volumina:

Zur Erarbeitung der dritten Dimension der Gletscherschwankungen, den Höhenänderungen, bietet sich bei den Hauptgletschern der Goldberggruppe in Ermangelung direkter Messungen (glaziologische Methode der Massenhaushaltsbestimmung mit Ablationspegeln, Schneeschächten etc., nach H. HOINKES, 1970) die „geodätische Methode" (Richard FINSTERWALDER, 1953), also der Höhenvergleich der Gletscheroberfläche mit Hilfe topographischer Karten verschiedener Aufnahmetermine, an.

Die Verhaltensunterschiede der einzelnen Gletscher der Goldbergruppe äußern sich bei den Eisdicken und -volumina viel deutlicher als bei den Flächen.

Bei den gemittelten Höhenänderungen über den Gesamtgletscher (siehe Abbildung 8) ergibt sich für den Zeitraum 1871 bis 1930 beim Wurtenkees eine mittlere

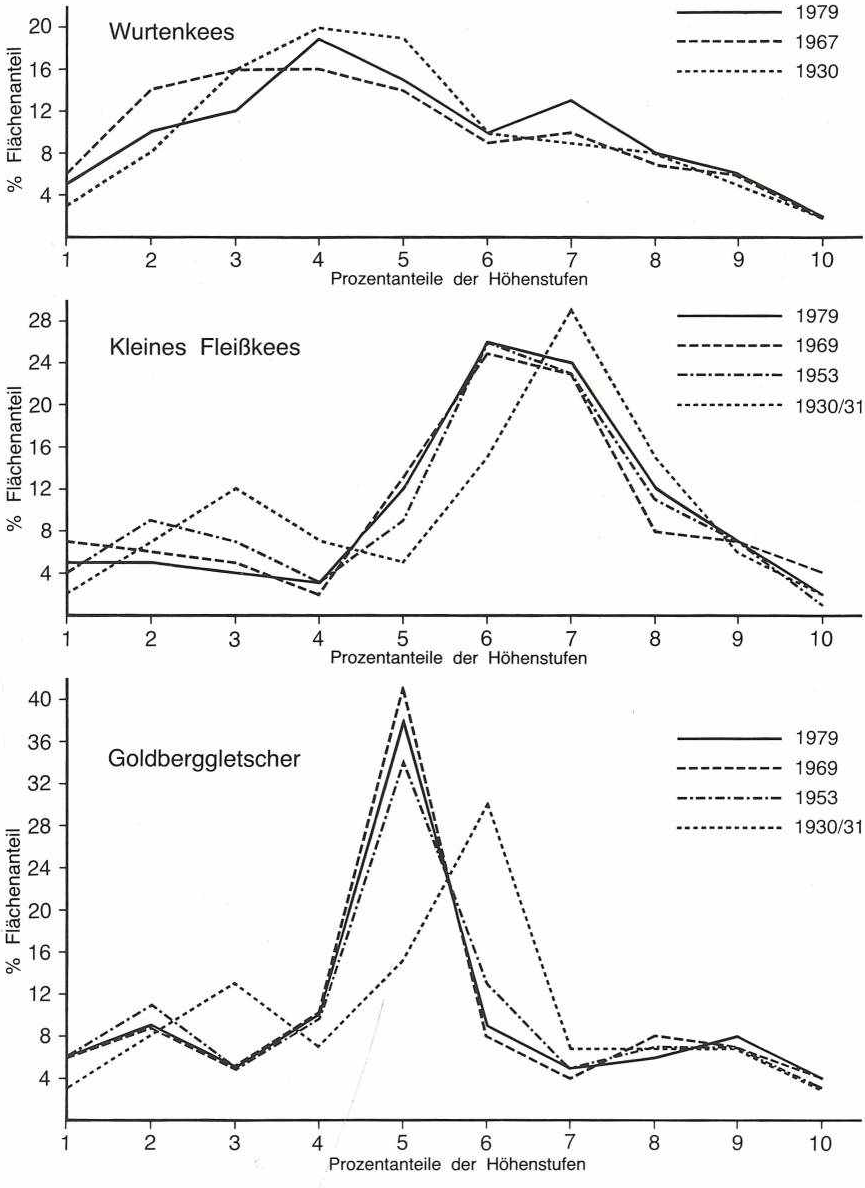


Abbildung 7: Normalkurven der Gletscher der Goldberggruppe, bezogen auf normierte Höhenstufen

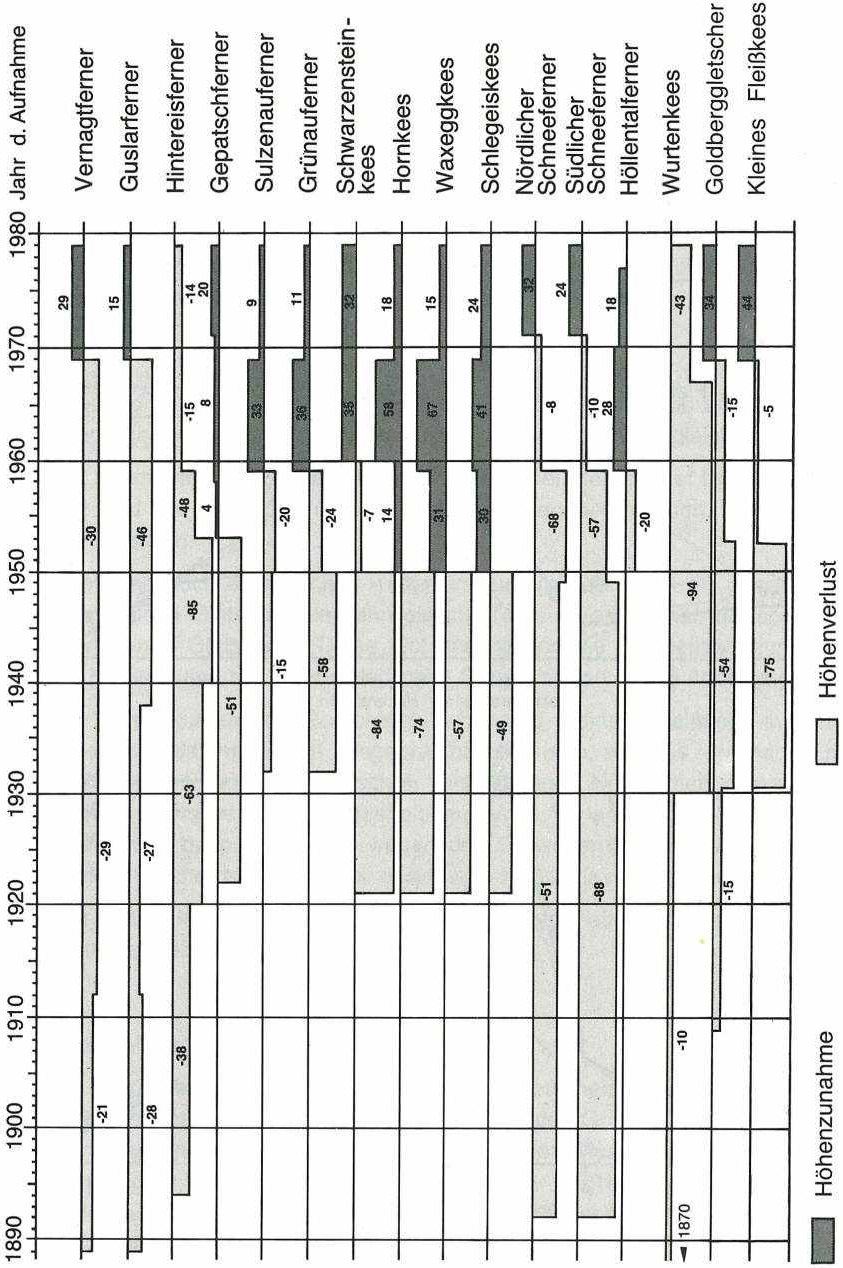


Abbildung 8: Jährliche Höhenänderung (in cm) ausgewählter Ostalpengletscher in der Zeit von 1889 bis 1979 (nach Richard FINSTERWALDER, H. RENTSCH, 1980, ergänzt nach R. BÖHM, 1983)

Eisdickenabnahme von 10 cm pro Jahr. Dahingegen betragen die Dickenabnahmen von fünf für diesen Zeitraum zur Verfügung stehenden Vergleichsgletschern zwischen 21 und 28 cm pro Jahr.

In der Periode 1930 bis 1967 dagegen liegt das Wurtenkees am entgegengesetzten Ende der Skala. Die jährliche Dickenabnahme beträgt 94 cm und stellt einen Negativrekord dar, speziell, wenn man bedenkt, daß diese Periode bereits die relativ gletschergünstigen Dezennien 1950 bis 1960 zur Gänze und 1960 bis 1970 teilweise umfaßt, wo andere Gletscher nur noch geringe Dickenverluste bzw. auch oft Aufhöhungen aufwiesen, welche zwischen 8 und 67 cm pro Jahr betrugen.

1967 bis 1979 verlangsamte sich das Einsinken der Gletscheroberfläche auf einen mittleren Betrag von 43 cm pro Jahr; es gibt in dieser Periode unter den in der Abbildung 8 angeführten Gletschern aber überhaupt nur noch einen einzigen, nämlich den großen und trägen Hintereisferner, der einen negativen Wert von −14 cm/Jahr aufweist, während alle anderen wieder anwachsen.

Die aufgrund dieser Ausnahmesituation im betreffenden Gebiet verstärkte Untersuchungstätigkeit soll unter anderem dazu dienen, die Gründe für den starken Rückgang dieses Gletschers zu eruieren.

Entsprechend den allgemeinen gletscherungünstigen Klimaverhältnissen sanken auch der Goldberggletscher und das Kleine Fleißkees zwischen 1930/31 und 1953 stark ein, dieses um 75 cm/Jahr, jener um 54 cm/Jahr. 1953 bis 1969 schwächte sich der jährliche Einsinkbetrag beim Goldberggletscher auf 15 cm, beim Kleinen Fleißkees auf 5 cm ab. Zwischen 1969 und 1979 nahmen diese beiden Gletscher wieder an Dicke zu, der Goldberggletscher um 34 cm, das Kleine Fleißkees um 44 cm jährlich, zeigten also bei weitem nicht dasselbe radikale Abschmelzverhalten wie das unmittelbar benachbarte Wurtenkees. So erhöhte sich beispielsweise die tiefste Stelle der Kleinen Fleißscharte – der Grenze zwischen dem Goldberggletscher und dem Kleinen Fleißkees – von 1953 bis 1979 um 12 m, während das Wurtenkees auch in seinen höhergelegenen Gletscherteilen praktisch nur Höhenverluste bis stagnierende Höhen (1967–1979) aufwies.

Da für das Wurtenkees wie auch für den Goldberggletscher und das Kleine Fleißkees eine Kartierung des Gletscheruntergrundes durchgeführt worden ist (E. BRÜCKL, O. BITTMANN, 1977), sind für diese Gletscher nicht nur die Höhenänderungen von kartographischem Termin zu kartographischem Termin, sondern auch Absolutwerte der vertikalen Eisdicken angebbar. Durch graphische Subtraktion der Höhenlinienpläne der Gletscheroberfläche und des Gletscheruntergrundes lassen sich Pläne der vertikalen Eisdicke relativ leicht konstruieren (R. BÖHM, 1983).

Die mittleren Eisdicken über den Gesamtgletscher betrugen 1930/31 beim Goldberggletscher 24,4 m, beim Kleinen Fleißkees 29,3 und beim Wurtenkees 48,3 m. In der Folge kam es beim Goldberggletscher bis 1953 zu einer Abnahme auf 12,2 und bis 1969 auf 9,8 m, beim Kleinen Fleißkees auf 12,5 bzw. 11,7 m. In bezug auf 1930/31 kam es also zu einer Dickenabnahme um 60%. Die Eisdicke ging beim Wurtenkees bis 1967 auf 13,6 m zurück, also um nicht weniger als 72%. Während aber die mittleren Eisdicken von Goldberggletscher und Kleinem Fleißkees im gletschergünstigen Zeitraum 1969 bis 1979 auf 13,2 bzw. 16,1 m zunahmen, reduzierte das Wurten-

kees seine Dicke weiterhin bis auf nur noch 8,4 m, wies 1979 daher lediglich 17,4% seiner Dicke aus dem Jahr 1930/31 auf.

Das Wurtenkees besteht seit der Mitte der siebziger Jahre nach lange anhaltendem Gletscherrückgang aus zwei in keinem Punkt mehr zusammenhängenden Teilen, dem sogenannten Schareckgletscherteil auf der orographisch linken Seite und dem kleineren Alteckgletscherteil.

Im Jahr 1930 kommt der bereits angedeutete Abschnürungsprozeß des Schareckfirnfeldes zum Vorschein: dieser kündigt sich mit minimalen Eisdicken bis unter 10 m im besagtem Gebiet an, während die Oberflächenkarte noch nichts davon zeigt.

Umgekehrt gab es an der Stelle zwischen Schareck- und Alteckgletscherteil, wo die Trennung der beiden Teile erfolgte, 1967 noch Eisdicken bis zu 20 m. Der Kartenvergleich zwischen den Karten 1b, 2b und 3b zeigt die anhaltende starke Rückentwicklung der Gletscherzunge.

Aussagen über das Gletschervolumen dürften wohl zu den interessantesten und für verschiedene Wirtschaftszweige auch wichtigsten Ergebnissen glaziologischer Untersuchungen zu zählen sein.

Die im folgenden gemachten Angaben über die Gesamtvolumina der Gletscher, die aufgrund der Existenz eines Untergrundschichtlinienplanes berechnet werden können, gelten bei Gletscheruntersuchungen infolge ihrer Wichtigkeit für verschiedenste praktische Fragen (Wasserreserven für Energieerzeugung, Trinkwasserreserven etc.) als Hauptuntersuchungszweck schlechthin.

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der geodätischen Volumsbestimmung wieder in Höhenstufen von 50 m dargestellt.

Im Jahr 1930 war die Stellung des Wurtenkeeses mit einem Volumen von 145 Millionen m³ im Vergleich zu den damals in der Mehrzahl bereits stärker abgeschmolzenen anderen Gletschern volumenmäßig sehr günstig. Der Goldberggletscher und das Kleine Fleißkees wiesen damals Volumina auf, welche mit 55 bzw. 46 Millionen m³ weniger als die Hälfte des Wurtenkeeses ausmachten. Der weitere kontinuierliche Rückgang des Wurtenkeeses bis 1979 auf 17 Millionen m³ bewirkte, daß der bis dahin immer deutlich kleinere Goldberggletscher mit seinen 25 Millionen m³ nun gegenüber dem Wurtenkees ein um 46% größeres Volumen besitzt, und sogar das Kleine Fleißkees das Wurtenkees um 16% an Volumen übertrifft.

Für das Wurtenkees stellen die Höhenzonen der Gletscherzunge zwischen 2.400 und 2.700 m (bis 1967) bzw. nur bis 2.600 m (1967 bis 1979) die Hauptverlustzonen dar. Es tritt wieder der sehr gletscherabträgliche Zeitraum 1930 bis 1967 hervor, wobei der Hauptteil des Verlustes bis 1953 erfolgt ist. Eindrucksvoll ist die Tatsache, daß in der Periode 1930 bis 1967 in mehreren 50-Meter-Höhenzonen jeweils etwa das gesamte Eisvolumen des Wurtenkeeses des Jahres 1979 abgeschmolzen ist. Typisch für das Wurtenkees ist der anhaltende Volumsverlust bis 1979 mit Ausnahme geringfügig positiver Zonen über 2.850 m Seehöhe.

Anhand der Abbildung 9 und der Karten ist deutlich das unterschiedliche Verhalten des Kleinen Fleißkeeses und des Goldberggletschers gegenüber dem Wurtenkees zu erkennen.

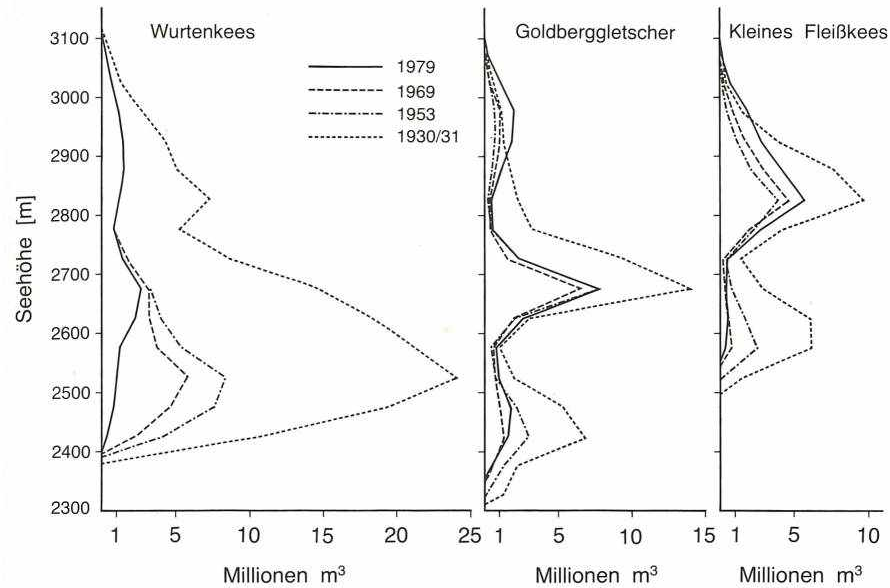


Abbildung 9: Gletschervolumen in Abhängigkeit von der Seehöhe in 50 m-Intervallen

Im gletscherungünstigen Zeitraum zwischen 1930 und 1953 ist es auch bei diesen Gletschern zu einem beträchtlichen Dicken- und damit Volumsverlust in allen Höhenlagen gekommen.

Beim Kleinen Fleißkees war die Abnahme der Eisdicke im Zungenbereich und auch oberhalb des Steilabbruchs zwischen 2.800 und 2.900 m im orographisch wenig gegliederten Firngebiet am stärksten, wenn auch merklich geringer als beim Wurtenkees, welches ja, wie schon erwähnt, als Ausnahmegletscher bezeichnet werden kann. So reduzierte sich das Volumen zwischen 2.800 und 2.900 m im betreffenden Zeitraum von 17,51 auf 6,08 Millionen m³, ging also um mehr als 65% zurück und verringerte sich im Zungenbereich zwischen 2.500 und 2.700 m um 70% (von 16,67 auf 5,07 Millionen m³).

Bedingt durch den beim Goldberggletscher seit 1930 stark fortschreitenden Abschnürungsprozeß an der Steilstufe zwischen 2.750 und 2.850 m traten unterhalb mit dem Wurtenkees vergleichbare Höhenverluste auf. Im Zungenbereich waren sie weniger stark, ähnlich wie beim Kleinen Fleißkees, markant größer allerdings auf der orographisch linken Gletscherseite, die ebenfalls unterhalb einer geländebedingten Abschnürungsstelle liegt. Zwischen 2.650 und 2.800 m nahm das Volumen von 26,59 auf 10,45 Millionen m³ ab, also um 60%, zwischen 2.300 und 2.500 m um 58% von 15,33 auf 6,36 Millionen m³.

1953 bis 1969 kommt es beim Kleinen Fleißkees und beim Goldberggletscher zu einer radikalen Trendumkehr. Während diese in guter Übereinstimmung mit der allgemeinen Klimaentwicklung (Abbildung 5a–5d) großflächige Höhenverluste zeigen – eine Ausnahme bildet nach wie vor der Teil des Goldberggletschers unterhalb des nun fast zur Gänze ausgeaperten obersten Steilabbruchs – gibt es nur noch im Bereich

der Gletscherzungen Eisdickenabnahmen. Im Gegensatz dazu und auch zu den meisten anderen untersuchten österreichischen Gletschern zeigt das Wurtenkees in allen vermessenen Höhenstufen beträchtlichen Rückgang.

Wohl am augenfälligsten ist der tendentielle Unterschied zwischen dem Wurtenkees und den beiden anderen Gletschern in der letzten Periode 1967/69 bis 1979. Während jenes auch noch weiterhin sein Volumen stark reduziert, nehmen das Kleine Fleißkees und der Goldberggletscher nun bereits in beinahe allen Höhenlagen zu. Lediglich beim Kleinen Fleißkees ist im nördlich gelegenen Zungenbereich noch eine Dickenabnahme zu beobachten. Beim Goldberggletscher erstreckt sich die Zuwachszone schon fast bis ans Zungenende, welches sich daher derzeit konstant verhält. Deshalb liegt der Schluß nahe, daß dann, wenn es zu keiner gletscherungünstigen Klimaentwicklung kommt, wohl mit einem Vorstoß dieses Gletschers gerechnet werden darf. Interessant ist dabei vor allem die Tatsache, daß der Goldberggletscher trotz der noch immer annähernd hundertprozentigen Trennung von seinem obersten Firngebiet diesen Zustand erreichen konnte. Solange es aber zu keiner neuerlichen Verbindung des gesamten Firngebietes kommt, dürfte sich dieser prognostizierte Vorstoß jedoch in Grenzen halten.

Im Gegensatz dazu kann vom nun schon in drei Teile zerfallenen Wurtenkees mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eine weiterhin starke Rückverlegung des Zungenendes vorausgesagt werden.

3.4. Neue Berechnungsmethoden für Bilanzgrößen

Unter dem Begriff „neue Methoden" sollen hier einige jener Techniken zusammengefaßt werden, die durch den Einsatz moderner Datenverarbeitung nicht nur erleichtert, sondern überhaupt erst möglich gemacht wurden. Einer qualitativ hochwertigen Berechnung mit entsprechender Genauigkeit für viele Bilanzgrößen steht bzw. stand die Vielfalt der Ausprägungsmöglichkeiten der topographischen Verhältnisse im Hochgebirge entgegen – diese mußte durch vereinfachende Annahmen lange Zeit sehr abstrahiert werden, um noch sinnvolle Resultate zu erlangen.

Erst moderne EDV-Anlagen verfügen über die entsprechende Kapazität, die reale Landschaft in genügend kleine Einheiten aufzulösen, um sie damit in problemorientierten Maßstäben modellhaft nachbilden zu können. Wird also der üblicherweise analog in Karten vorliegende Informationsgehalt in digitale, maschinell verarbeitbare Form transformiert, so spricht man von digitalen Höhenmodellen bzw. digitalen Geländemodellen (DGM), sofern noch andere Informationen außer der Seehöhe erfaßt und gespeichert sind.

Gewöhnlich basieren also solche DGM auf einem Quadratraster mit jeweils zu wählender Maschenweite (etwa 25–100 m). Vorerst muß für jeden dieser Rasterpunkte die Höhe vorliegen (J. PEIPE, P. REISS, H. RENTSCH 1978). Der einfachste, jedoch arbeitsintensivste Weg zu dieser Matrix von Höhen ist das Ablesen aus einer entsprechenden Karte. Dies kann jedoch nicht für mehrere Gebiete und/oder Zeitpunkte zu Vergleichszwecken gemacht werden, automatisierbare Erfassungsmethoden sind also erforderlich. Dazu können Digitizer (Koordinatenerfassungsgeräte) beim Ausgehen von bestehenden Isohypsenplänen verwendet werden, oder es wird im Zug der Orthophotoerstellung bei stereophotogrammetrischer Auswertung von Meßbildern

der Höhenraster gespeichert und steht somit auch für andere Arbeiten zur Verfügung (G. J. YOUNG – K. C. ARNOLD, 1977). Die Photogrammetrie und Geodäsie stellt hier also wieder wichtige Arbeitsgrundlagen für quantitative Analysen landschaftlicher Gegebenheiten her.

Um die topographischen Verhältnisse bzw. die Parameter mit Einfluß auf klimatische Elemente direkt und quantitativ umsetzbar zu beschreiben, werden aus dem Höhenraster Variable wie Neigung, Hangrichtung (Azimut) und Bombierung (konkav oder konvex) errechnet und jedem Punkt der Matrix zugeordnet (G. J. YOUNG, 1973a). Ebenso ist eine sinnvolle Art der Repräsentation der Horizontlinie (soweit sie im möglichen Bereich der Sonnenbahn liegt) von Interesse, um Modifikationen des Strahlungsganges berechnen zu können.

Eine derartige (nahezu beliebig genaue) zahlenmäßige Erfassung der Topographie eines Untersuchungsgebiets ist vorerst zweckneutral und kann damit für eine Vielzahl möglicher Fragestellungen eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei sinnvollerweise bei allen jenen Prozessen, die hauptsächlich von topographischen Faktoren gesteuert sind. Beispiele im Rahmen der gegebenen Thematik sind etwa Strahlungsgenuß, alle Höhenabhängigkeiten, Niederschlagsverteilung und Lawinenzonen. Ebenso kann ein derartiges Modell mit konventioneller glaziologischer Arbeitsweise verbunden werden (G. J. YOUNG, 1976) und neben vielen anderen Anwendungen auch die automatisierte graphische Dokumentation unterstützen.

Von größtem Interesse ist dieser Wechsel in der Arbeitsweise jedoch nicht durch einfache „Automatisierung", d. h. Erleichterung und größere Exaktheit bzw. Auflösung bei auch sonst durchgeführten Arbeitsprozessen, sondern durch das Ermöglichen eines Übergangs von rein deskriptiver zu explanatorischer Arbeitsweise. Während bisher die Gletscherreaktion in allen ihren Manifestationen zu erfassen versucht wurde, gaben begleitende Korrelationsversuche mit meteorologischen Elementen wenig Anlaß zu Optimismus in prognostischer Sicht, was ja der Prüfstein für jegliche Erklärung von Prozessen sein sollte. Jetzt aber kann der entscheidende Faktor für die unterschiedliche Reaktion verschiedener Gletscher, die topographischen Verhältnisse, explizit in die Berechnung der davon betroffenen Bilanzgrößen einbezogen werden und bietet damit eine solide Basis für explanatorische Ansätze, die wohl meist im Rahmen einer Gesamtmodellierung der Energie- und Massenbilanz eines Gletschers zu sehen sind. Eine Verbindung zu (z. T. bestehenden) eismechanischen Modellen der Fließbewegung ergäbe ein anzustrebendes umfassendes Modellabbild vom Ablauf klimatischer Prozesse bis hin zur räumlichen und zeitlichen Ausprägung der Gletscherreaktion.

4. ARBEITEN AUF MODELLGRUNDLAGE

Wie bereits in Kapitel 3.4. besprochen wurde, erachten die Verfasser als die wichtigste Grundlage für künftige quantitative Untersuchungen das digitale Geländemodell. Für die drei Hauptgletscher dieser Gebirgsgruppe (Wurtenkees, Kleines Fleißkees und Goldbergkees) wurden solche Modelle erstellt und zur Berechnung der solaren Einstrahlung verwendet. Diese Arbeiten sind bei J. STROBL, 1983 dokumentiert. Es wurde ein Quadratraster mit 50 m Maschenweite verwendet und die dafür benötigten Ausgangsdaten aus der Aufnahme 1 : 5.000 mit einer Äquidistanz von 10 m mittels Digitizer entnommen. Die Modelle wurden nicht nur für die Gletscheroberfläche, sondern auch für die Gebirgsumrahmung zwecks Einbeziehung aller potentiell abschat-

tenden Kämme berechnet. Neben der Höhe liegen für jeden Punkt noch Werte für den Oberflächenzustand (Eis, Fels oder Wasser), Hangneigung und -richtung sowie Bombierung vor. Dazu kommen die vollständigen Horizontprofile in 15° (= 1 Stunde)-Schritten, die den jeweiligen Elevationswinkel des und die Entfernung zum abschattenden Punkt angeben.

Diese Modelle wurden vorerst zur Berechnung der solaren (kurzwelligen) Einstrahlung verwendet, es sind aber auch eine Anzahl weiterer Anwendungen denkbar. Ebenso sollten bestehende derartige Modelle (sofern sie wie hier ins Landeskoordinatensystem „eingehängt" sind) auch als einheitliches Lagebezugssystem für alle relevanten Messungen im Untersuchungsgebiet verwendet werden – eine Zusammenhangsanalyse aller beobachteten Phänomene untereinander sowie mit topographischen Variablen ist dann problemlos durchführbar. Ein Beispiel für die Anwendung zur Analyse der Niederschlagsverteilung wäre die Arbeit von G. J. YOUNG, 1973b.

Einige Ergebnisse der auf den Geländemodellen basierenden Berechnungen sollen nachfolgend vorgestellt werden. Sämtliche Resultate können dabei in zweifacher Weise aufbereitet werden. Eine graphische Darstellung der regionalen Muster der Variablenausprägungen je Rasterpunkt ermöglicht das visuelle Erfassen der Verteilung und regt zur Theoriebildung über mögliche Zusammenhangsstrukturen an. Für den exakt zahlenmäßigen Vergleich ist Summation bzw. Mittelbildung und zonale Zusammenfassung erforderlich, da nur höher aggregierte Daten entsprechenden Überblick bieten und in Zahlenform zur Weiterverarbeitung geeignet sind.

Eine auschauliche Darstellung eines solchen DGM bietet eine Schrägsichtkonstruktion wie in Abbildung 10. Jeder Schnittpunkt der Gitterlinien repräsentiert einen Rasterpunkt des Modells. Die Oberfläche unterliegt bei der Maschenweite von 50 m naturgemäß einer gewissen Glättung, zeichnet aber alle wichtigen topographischen Formen des Mesoreliefs gut nach. Für jeden dieser Modellpunkte kann aus der relativen Konfiguration einer Anzahl von Nachbarpunkten der bereits erwähnte Satz morphographischer Variabler errechnet werden.

In Abbildung 11 wurden für die drei Variablen Bombierung, Exposition und Hangneigung die Mittelwerte nach Höhenstufen gebildet und diese im Vergleich der 3 Untersuchungsgebiete sowie in der Höhenzonenabfolge einander gegenübergestellt. Eine derartige Analyse der topographischen Gegebenheiten bildet die Grundlage für die folgende Untersuchung von Phänomenen, die durch die jeweilige Geländeausformung beeinflußt werden.

Ein erster Schritt zur angestrebten Berechnung der solaren Einstrahlung ist die Berücksichtigung der Abschattungswirkung (sowohl Schlagschatten als auch Eigenabschattung von Geländeteilen). Dies kann für jeden beliebigen tages- und jahreszeitlichen Sonnenstand berechnet werden.

Integriert man die Strahlungsintensitäten auf jeden Modellpunkt über die Zeiten stattfindender Besonnung, so läßt sich daraus eine Karte der potentiellen extraterrestrischen direkten kurzwelligen Einstrahlung errechnen. Die hier vorliegende Verteilung des Strahlungsgenusses ist eine Folge der Geländegestaltung und auf die jeweils relevanten topographischen Parameter zurückzuführen. Berücksichtigt man dann zusätzlich den Einfluß des aktuellen Zustands der Atmosphäre (detaillierte Darstellung in J. STROBL, 1983), so läßt sich der aktuelle kurzwellige Strahlungsgenuß

der Teilfläche des DGM feststellen. Die räumliche Differenzierung der solaren Einstrahlung ist einer der wichtigsten Faktoren (neben der Niederschlagsverteilung), die zur Ausbildung regionaler Muster der Schnee- und später damit auch der Eisverteilung führt. Als entscheidende Größe im Ablauf der jährlichen Ablation ist dieses Klimaelement auch für den Ernährungszustand und damit die Existenz der Gletscher als solche verantwortlich.

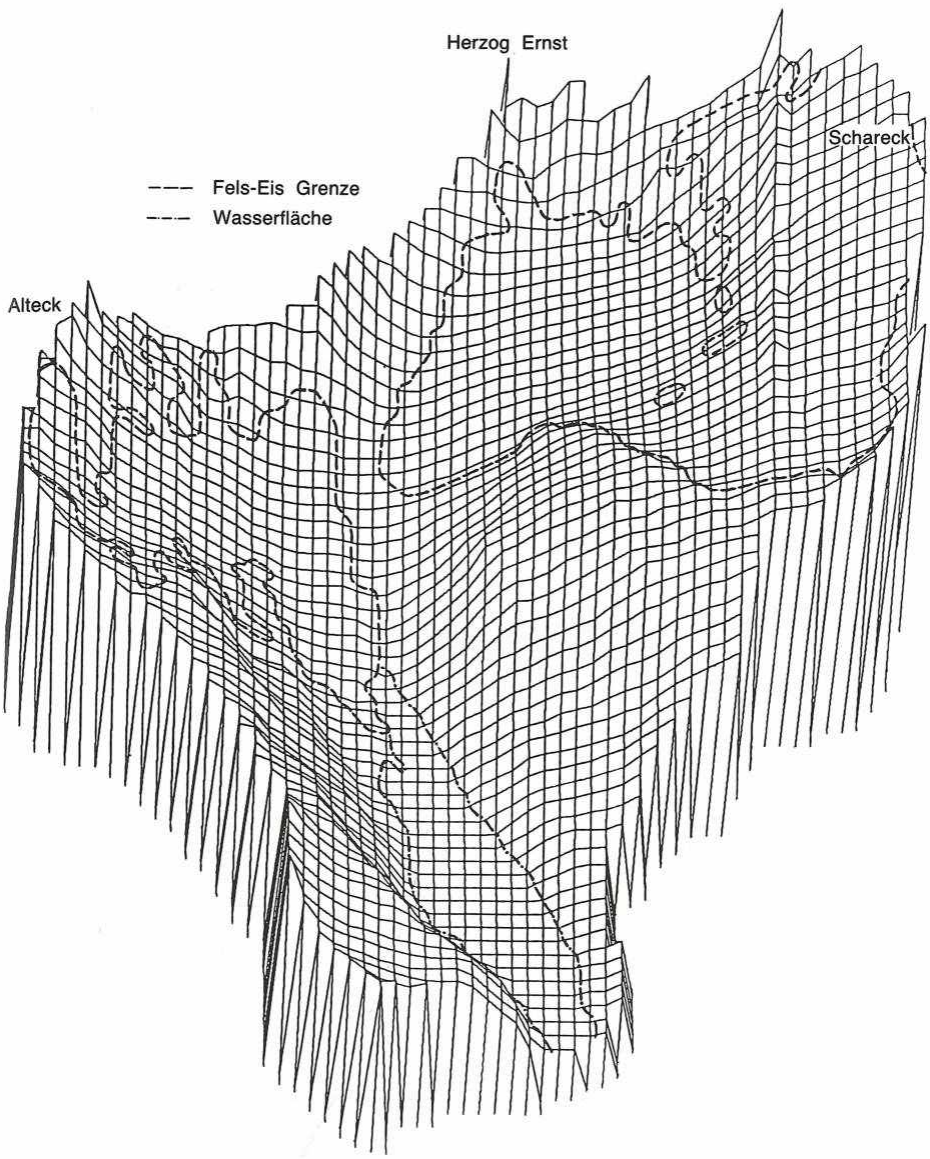
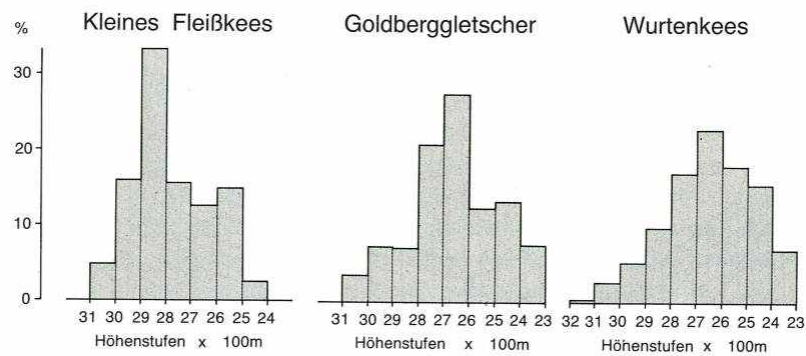
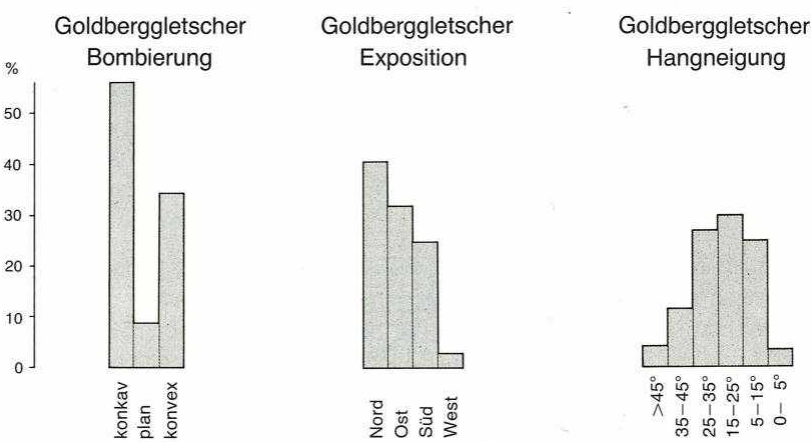


Abbildung 10: Schrägriß des Wurtenkeesgebietes nach DGM (überhöht, Blickrichtung Nord, Draufsicht 60°)

Dieses kurze Beispiel einer möglichen Anwendung zeigt sicherlich zur Genüge die enormen Vorteile, die ein quantitatives Arbeiten auf Modellbasis für derartige Forschungsansätze mit sich bringt. Es soll aber nicht der Eindruck erweckt werden, daß nunmehr alle bisher ausschließlich empirisch erfaßten Elemente einer rechnerischen Synthese zugänglich sind. Vielmehr sind alle diese aktuellen Meßwerte für die Eichung des Rechenablaufes erforderlich, wirklich „errechnet" wird nur die räumliche Differenzierung durch den Einfluß der im Geländemodell zusammengefaßten topographischen Variation innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Diese regionale Aufgliederung würde jeden möglichen meßtechnischen Aufwand bei weitem überschreiten und wird erst durch Ansätze wie den hier skizzierten ermöglicht. Es ist zu hoffen, daß



Höhenverteilung der Rasterflächen in den digitalen Geländemodellen der drei Hauptgletscher der Goldberggruppe.



Statistik der morphographischen Variablen am Beispiel des digitalen Geländemodells Goldberggletscher.

Abbildung 11: Diagramme topographischer Parameter auf der Grundlage digitaler Geländemodelle

damit ein Anfang für den modellhaften Nachvollzug der laufend wirksamen Prozesse in einem für diese zutreffenden Maßstab gemacht ist. Die bisher fehlende interne Differenzierung bei der Zusammenhangsanalyse des Gesamtgletscherverhaltens mit großräumigen meteorologischen Variablen müßte damit überwunden sein.

Neben der Ausdehnung dieser Methodik auf weitere steuernde Faktoren des Gletscherverhaltens wird auch eine Verbesserung auf dem Sektor der Modellerstellung angestrebt. Künftige direkt aus Stereoaufnahmen errechnete Höhenmodelle sollen die Grundlage bilden für mittels photogrammetrischer Techniken eingepaßte Amateuraufnahmen. Diese billig herzustellenden Photographien können dann zur Beobachtung und Erfassung vieler unterschiedlicher Merkmale der Geländeoberfläche verwendet werden. Im Vordergrund steht dabei ein Verfolgen des Ablationsprozesses über Ausaperungsfiguren und Änderungen der räumlichen Albedoverteilung. Hier kommt also der empirische Zweig der Modellanwendung wieder stärker zum Tragen und wird interessante Vergleichsansätze mit den errechneten Strahlungswerten und der flächig interpolierten Niederschlagsverteilung anbieten.

Die Arbeit auf Modellgrundlage ist somit eine wertvolle Ergänzung zu der bisher erprobten Methodik der Gletscherforschung. Mit dem weiteren Vordringen leistungsfähiger Rechenanlagen wird dieser Ansatz sicherlich noch an Bedeutung gewinnen und bald zu den Standardmethoden der Bearbeitung auch anderer topographisch gesteuerter Prozesse zählen. Das eigentliche Instrumentarium dieser Arbeitsweise (hauptsächlich Computerprogramme) befindet sich erst in Entwicklung, auf diesem Gebiet bleibt noch umfassende Arbeit zu leisten.

5. ERKLÄRUNGSVERSUCH DES UNTERSCHIEDLICHEN VERHALTENS DER DREI BETRACHTETEN GLETSCHER

Wie die Karten und kartometrischen Ergebnisse bezüglich der Flächen-, Höhen- und Volumsänderungen der drei unmittelbar benachbarten Gletscher (siehe Abbildung 9) zeigen, verhalten sich diese in letzter Zeit sehr unterschiedlich. Während der Goldberggletscher und das Kleine Fleißkees konform zum allgemeinen Trend der Ostalpengletscher seit Mitte der sechziger Jahre dieses Jahrhunderts ihre Eismasse vergrößerten, nahm das Wurtenkees in dieser Zeitspanne weiter stark ab, was sich z. B. in der neuerlichen Halbierung seines Volumens in den 12 Jahren von 1967–1979 manifestiert. Dieses Abweichen des Wurtenkeeses vom „Normverhalten" (trotz der großen Streuung dieses Begriffes) war der Grund, es genaueren Untersuchungen zu unterziehen.

Es wurden einerseits (J. STROBL, 1983) mit Hilfe von Geländemodellen und den Meßergebnissen des Sonnblick-Observatoriums die kurzwelligen Einstrahlungsverhältnisse der drei Gletscher für die wahren Flächen berechnet (eine Ausweitung auf die Albedo mit Hilfe von terrestrisch-photogrammetrischen Schneekartierungen ist derzeit im Gange) und auf dem Wurtenkees wurde seit 1981 die Feldmeßtätigkeit im Hinblick auf Massenbilanzierungen nach der direkten glaziologischen Methode stark intensiviert.

Beide Methoden lieferten bereits interessante Hinweise, die in der Folge skizziert werden sollen:

Die über das Geländemodell berechneten Strahlungsverhältnisse zeigen beim Wurtenkees in allen Monaten gegenüber einer ebenen Fläche einen Strahlungsgewinn durch den kombinierten Effekt aus Neigung, Exposition und Abschattung, der sich je nach Jahreszeit und Lage auf dem Gletscher zwischen 5 und 50% bewegt, eine für einen Gletscher sehr ungünstige Tatsache. Die am stärksten benachteiligten Zonen sind dabei die Zonen über 2.700 m Seehöhe, also das potentielle Nährgebiet des Gletschers, während die unteren Teile etwas strahlungsgeschützter liegen, aber auch dort nicht von einer gletschergünstigen Lage gesprochen werden kann. Goldberggletscher und Kleines Fleißkees haben durch ihre ausgeprägtere Muldenlage und nicht so südexponierte Orientierung überwiegend günstigere Strahlungsverhältnisse als sie einer ebenen Fläche zukämen (günstig hier jeweils auf für die Massenbilanz günstig zu verstehen, also geringerer Strahlungsgenuß). Nur der oberste Teil des Goldberggletschers (oberhalb 2.800 m Seehöhe) hat mit dem Wurtenkees vergleichbare, massenbilanzabträgliche Strahlungsverhältnisse, die aber dort durch die sehr geschützte Lage bereits des mittleren Keesbodens (2.800 m und tiefer) aufgewogen wird. Wie bereits bei den Kartenvergleichen gezeigt, kann dieser Gletscher in seiner strahlungsgeschützten Lage auch ohne direkte Verbindung mit seinem oberen Firngebiet in den letzten 20 Jahren einen ausgeglichenen bis positiven Massenhaushalt aufrechterhalten.

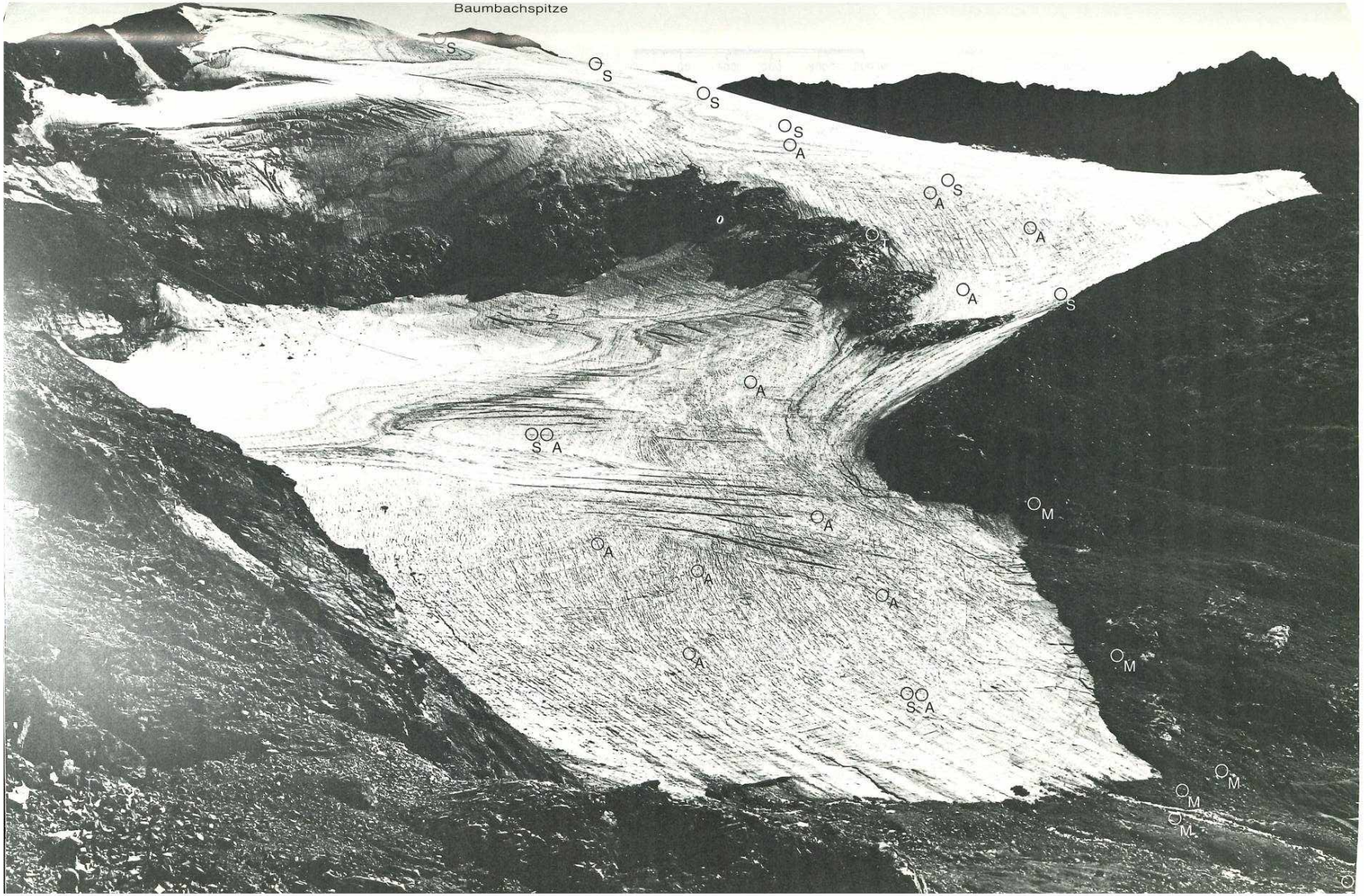
In Zahlen ausgedrückt (von J. STROBL, 1983) für die wahren Gletscherflächen und für die 1979 am Sonnblick registrierten Strahlungssummen berechnet) empfing das Wurtenkees in diesem Jahr in den Monaten Oktober bis April (Gletscherwintersaison) um 30% mehr kurzwellige Globalstrahlung als der Goldberggletscher und in den Gletschersommermonaten (Mai–September) um 7% mehr, wobei die Sommerwerte durch die bekannten Rückkopplungsmechanismen über die Albedo (siehe dazu die Albedountersuchung der Sonnblick-Gletscher von W. MAHRINGER, E. SCHEIBNER, 1968) auch größere Unterschiede als die 7% aufweisen werden. Das Kleine Fleißkees liegt bezüglich seines Strahlungshaushaltes zwischen den beiden anderen, aber näher beim Goldberggletscher, also strahlungsgünstig.

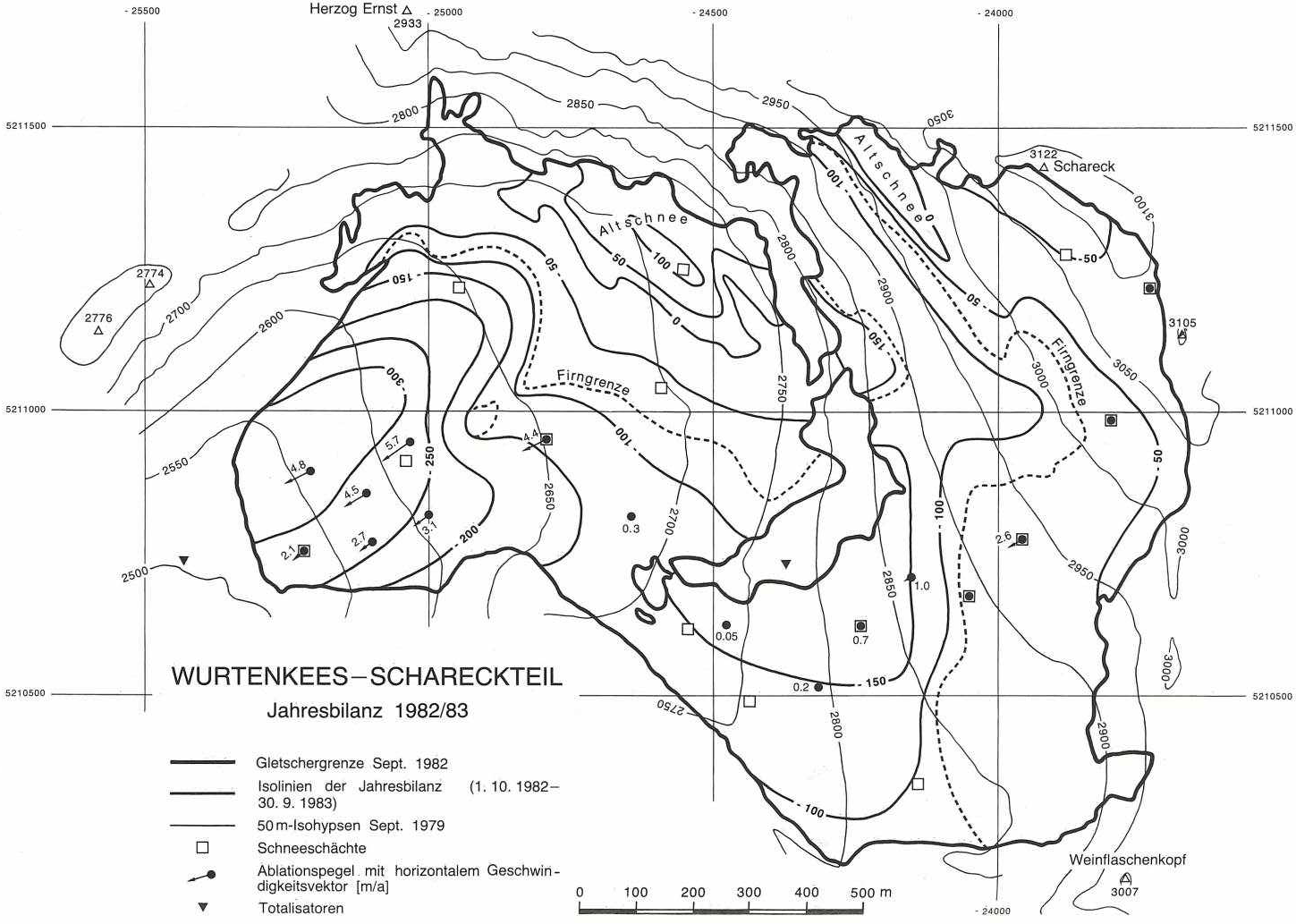
Verstärkt wird der Strahlungseffekt beim Wurtenkees durch die bezüglich Wind- und Lawinenverfrachtung ungünstige Orographie seines potentiellen Nährgebietes beim Schareck. Das zeigte sich bereits bei den Ergebnissen der ersten beiden vorhandenen Wintermassenbilanzen des Schareck-Gletscherteils deutlich (R. BÖHM, N. HAMMER, 1982, und R. BÖHM, 1983).

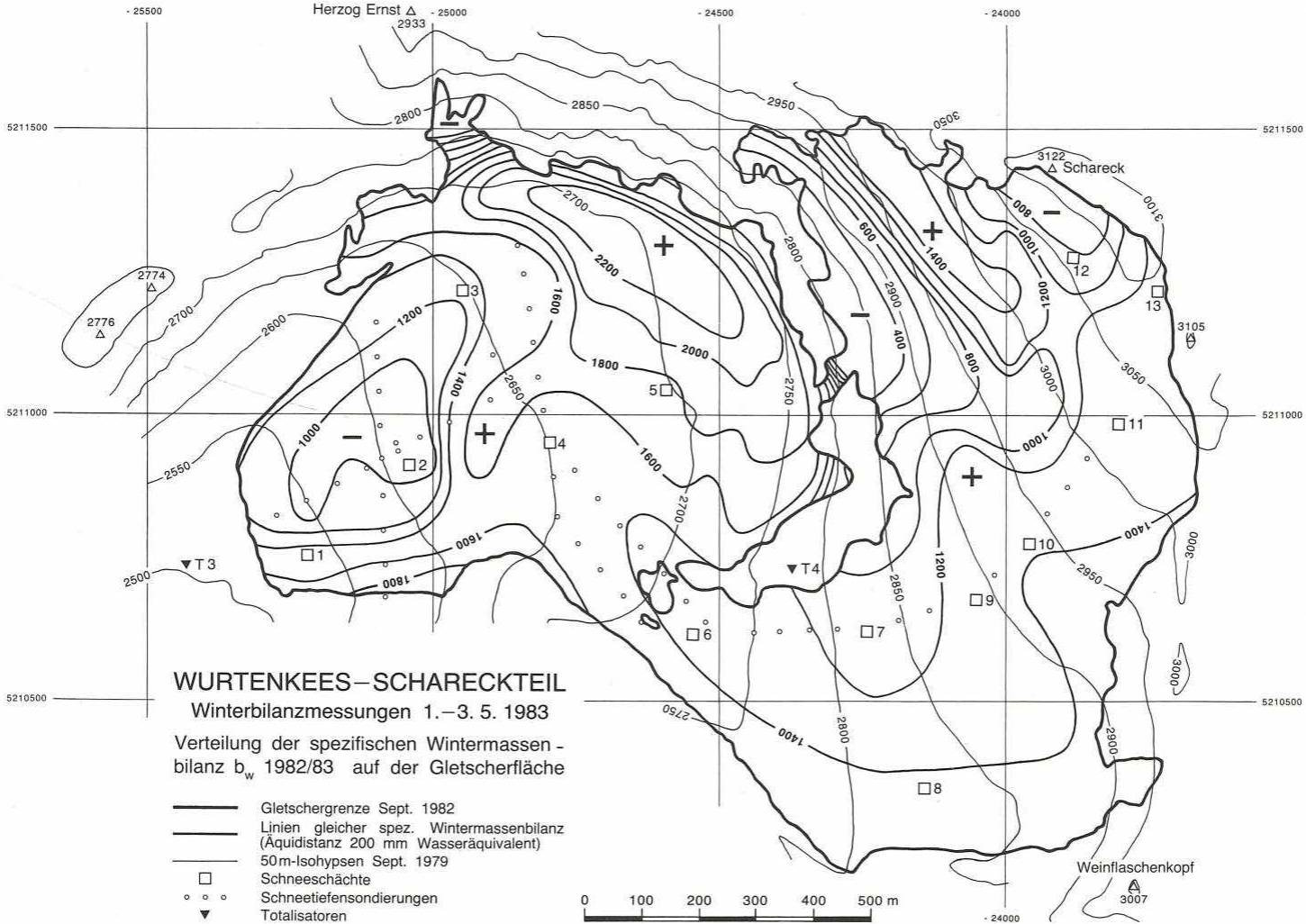
Bild 3 zeigt das auf dem untersuchten Gletschergebiet existierende Massenbilanz-Meßnetz (einige Ergänzungen bezüglich der Pegeldichte wurden in der Zwischenzeit vorgenommen. Infolge der relativ leichten Erreichbarkeit Anfang Mai und der auf großen Gletscherteilen eher geringen Lawinengefahr konnte hier mit Erfolg versucht werden, nicht nur die Jahresmassenbilanz zu erarbeiten (vergleiche Kapitel 3.1), sondern auch Winterbilanzierungen durchzuführen. Viele andere Gletscher stellen im Bergwinter solchen Versuchen zu große Hindernisse entgegen, und es gibt daher über den

---

Zum nebenstehenden Bild 3: Wurtenkees–Scharecktеil am 18. 9. 1982 mit glaziologischem Meßnetz auf diesem Gletscher (S: Schneepegel, A: Ablationspegel, T: Niederschlagsammler, M: Meßmarken)


Baumbachspitze
S
S
S
S
A
S
A
A
A
S
A
S A
A
M
A
A
A
A
A
M
S A
M
M
M


WURTENKEES–SCHARECKTEIL
Jahresbilanz 1982/83
Gletschergrenze Sept. 1982
Isolinien der Jahresbilanz (1. 10. 1982–30. 9. 1983)
50 m-Isohypsen Sept. 1979
Schneeschächte
Ablationspegel mit horizontalem Geschwindigkeitsvektor [m/a]
Totalisatoren
0 100 200 300 400 500 m
Herzog Ernst 2933
Schareck 3122
Weinflaschenkopf 3007
Altschnee
Firngrenze
- 25500
- 25000
- 24500
- 24000
5211500
5211000
5210500



WURTENKEES – SCHARECKTEIL

Winterbilanzmessungen 1.–3. 5. 1983

Verteilung der spezifischen Wintermassen-bilanz b_w 1982/83 auf der Gletscherfläche

- Gletschergrenze Sept. 1982
- Linien gleicher spez. Wintermassenbilanz (Äquidistanz 200 mm Wasseräquivalent)
- 50 m-Isohypsen Sept. 1979
- □ Schneeschächte
- ○ ○ ○ Schneetiefensondierungen
- ▼ Totalisatoren

TAFEL II

Zustand der Gletscher zu Ende der Wintersaison wesentlich weniger durch Messungen abgesichertes Wissen als über das sommerliche Verhalten.

Die erwähnten ungünstigen orographischen Verhältnisse des Wurtenkeeses werden auf der Tafel II die die Winterbilanz des Winters 1982/83 darstellt, deutlich:

Zum Unterschied von der üblichen Muldenlage der Gletscher-Akkumulationsgebiete, die diesen z. T. wesentlich höhere Winterbilanzwerte bescheren, als sie ihnen vom direkten Niederschlag her zukämen (beschrieben bei H. HOINKES, 1957), liegt das potentielle Nährgebiet des Wurtenkeeses (oberhalb des felsigen Steilabbruches auf Bild 3) sehr windexponiert, eher konvex und ohne höhere Kammumrahmung den Hauptwindrichtungen SW–W direkt ausgesetzt (F. STEINHAUSER, 1938). Somit wirkt der von H. HOINKES beschriebene Faktor Windverfrachtung für diesen Gletscherteil des Wurtenkeeses in entgegengesetzter Richtung: Der winterliche Niederschlag wird eher vom Gletscherfirngebiet fortgeweht. Darüberhinaus liefern die steilen Zonen unmittelbar oberhalb des Felsriegels zusätzlich große Schneemengen durch Lawinenverfrachtung über die Felsen hinweg in tiefergelegene Gletscherteile. Diese Zonen im tiefer eingeschnittenen obersten Wurtental, die die Nutznießer der beschriebenen indirekten Ernährung durch Wind- und Lawinentransport sind, liegen aber unter einer Seehöhe von 2.700 m. In derart niedriger Höhe wird aber bei der dort gegebenen Südexposition im Sommer die Ablation bereits sehr stark wirksam, sodaß diese Schneemassen das Haushaltsjahr i. a. nicht überstehen und somit nur sehr wenig zur Ernährung des Gletschers beitragen können.

Diese qualitative Modellvorstellung eines wind- und lawinenbedingten Abtransportes von den ablationsgeschützteren oberen Gletscherteilen in ablationsstarke tiefere Regionen hat sich bei den ersten beiden erstellten Winterbilanzen quantitativ bestätigt.

Die Karte der Winterbilanz 1982/83 (siehe Beilage) zeigt alle von der oben skizzierten Hypothese geforderten Effekte: allgemein hohe Winterbilanzwerte auf der Gletscherzunge mit dem Maximum im lawinenbestrichenen und windgeschütztesten Teil unmittelbar unter dem Steilabfall mit Werten bis über 200 g/cm². Eine dieser mächtigen Grundlawinen, die Ende Jänner 1983 abging (Datierung durch Stratigraphie und persönliche Hinweise von J. KERSIC) wurde bei einem Schneeschacht direkt ergraben, was pikanterweise zum Bruch einiger als „Lawinenrettungsschaufeln" gekaufter Grabewerkzeuge führte. Deutlich niedrigere Winterbilanzwerte und Schneehöhen weist hingegen das Schareck-Firnfeld auf mit Werten nur um 100 g/cm². Das Minimum an der konvexesten Stelle der unteren Gletscherzunge zeigt den starken Einfluß bereits geringer Änderungen der Krümmungsverhältnisse.

Auch die seit dem Jahr 1981 durchgeführten Totalisatorenmessungen im Wurtenkeesgebiet passen in dieses Bild. Der höchstgelegene Totalisator T4 erhält geringere Winterniederschlagsmengen als der tiefergelegene T3 vor der Gletscherzunge, während das Verhältnis im Sommer umgekehrt ist, ein Hinweis auf die geringere Windanfälligkeit der zu einem höheren Prozentsatz flüssigen Sommerniederschläge. Die entsprechenden Meßwerte der beiden Sammler waren z. B. in der ersten Meßsaison 1981/82 im Winter (Okt.–Apr.) 1.200 mm in 2.511 m Seehöhe und 882 mm in 2.791 m, während im Sommer (Mai–Sept.) im tiefergelegenen Gerät 863 mm und im höhergelegenen 951 mm gesammelt wurden.

Noch deutlicher als die Winterbilanzkarte zeigt die Abbildung 12 das gletscherungünstige Verfrachten des Schnees vom Nähr- ins Zehrgebiet. Da die Bilanzierung (= kartometrische Volumsbestimmung) abschnittsweise für 50 m-Seehöhenintervalle durchgeführt wird (die erarbeitete Karte hat im Original den Maßstab 1 : 5.000, der derartige Auswertungen zuläßt), läßt sich die Höhenabhängigkeit der Winterbilanz (Mittelwerte der Höhenstufe) darstellen.

Sofort fällt das – gegenüber dem gewohnten Bild einer Niederschlagszunahme mit der Höhe – abweichende Verhalten im Wurtenkeesgebiet auf. Verdeutlicht wird dieser Effekt durch die strichlierte Linie, die die im Bereich des Sonnblicks (nach

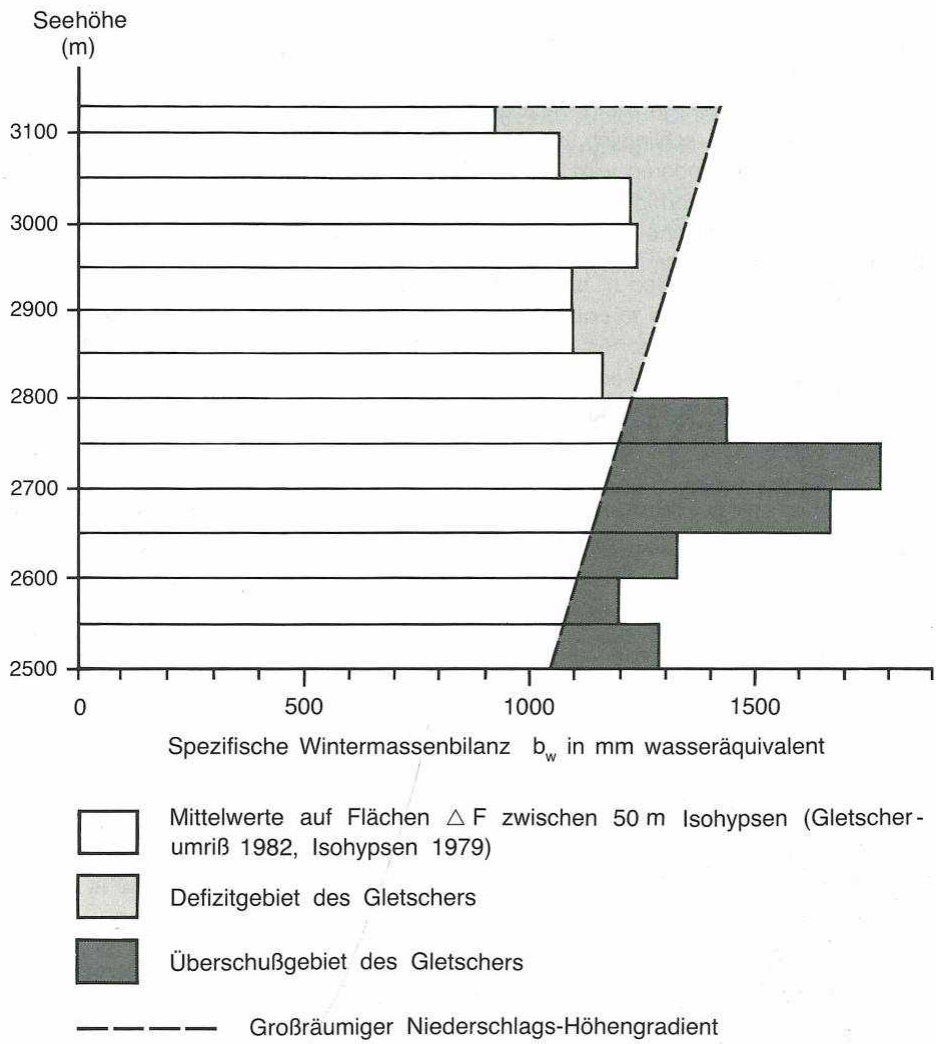


Abbildung 12: Spezifische Wintermassenbilanz 1982/83 in Abhängigkeit von der Seehöhe

H. TOLLNER, 1961 bzw. F. STEINHAUSER, 1938) zu erwartende Niederschlags-Höhen-Kurve im mesoscale darstellt, während die tatsächliche Massenbilanzverteilung dem lokalen scale des Gletschers zuzuordnen ist. Die „–"-Fläche in der Abbildung quantifiziert das Massendefizit der höhergelegenen Gletscherteile und die „+"-Fläche den Gewinn der Gletscherzunge durch indirekte Ernährung, der aber im Sommer weitgehend verloren geht, wie die Karte der Jahresbilanz zeigt.

ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden qualitative und quantitative Methoden der Gletscherforschung kurz vorgestellt und deren Anwendung auf die Hauptgletscher der Goldberggruppe genauer geschildert, die sich in der betrachteten Zeitspanne sehr unterschiedlich verhalten haben. Es wird dargestellt, welche Aussagen über das Gletscherverhalten und welche Prognosen gemacht werden können. Dabei wird von den am einfachsten anzustellenden Messungen, denen der Zungenlängenänderungen, ausgegangen. Es werden dann die Flächenänderungen mit Hilfe von Kartenvergleichen dargelegt und schließlich werden die Eisdicken- und Volumsuntersuchungen besprochen. Im besonderen wird auf die kartographischen Grundlagen eingegangen, die in Form von mehrfärbigen Gletschervergleichskarten von verschiedenen Terminen vorgestellt werden, welche die unterschiedlichen Reaktionen verschiedener Gletscherteile und der Gesamtgletscher auf die Klimaschwankungen der letzten 50 Jahre illustrieren.

LITERATUR

AMBACH, W.: Untersuchungen des Energiehaushalts und des freien Wassergehalts beim Abbau der winterlichen Schneedecke. In: Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, Band 14, Nr. 2, 1965.

BÖHM, R. und N. HAMMER: Ergebnisse der ersten Meßperiode des Massenhaushaltsuntersuchungsprojekts Wurtenkees im hydrologischen Winter 1981/82. Unveröffentl. Zwischenbericht an die Österr. Akademie der Wissenschaften, 1982.

BÖHM, R.: Massenhaushalt Wurtenkees – Winterbilanz 1982/83. Ebenda, 1983, a.

– : Massenhaushalt Wurtenkees – Jahresbilanz 1982/83. Ebenda, 1983, b.

BRÜCKL, E. und O. BITTMANN: Die Ergebnisse der seismischen Gletschermessungen im Bereich der Goldberggruppe (Hohe Tauern) in den Jahren 1971 und 1972. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Heft 25, 1977.

FINSTERWALDER, Richard: Die zahlenmäßige Erfassung des Gletscherrückgangs an Ostalpengletschern. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band II, Heft 2, 1953.

FINSTERWALDER, Rüdiger und H. RENTSCH: Die Erfassung der Höhenänderung von Ostalpengletschern in den Zeiträumen 1950–1959–1969. Ebenda, Band XII, Heft 1, 1976.

– : Zur Höhenänderung von Ostalpengletschern im Zeitraum 1969–1979. Ebenda, Band XVI, Heft 1, 1980.

HOINKES, H.: Über die Schneeumlagerung durch den Wind. In: 51.–53. Jahresbericht des Sonnblickvereins, 1957.

LANG, H. und G. PATZELT: Die Volumenänderung des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) im Vergleich zur Massenänderung im Zeitraum 1953–1964. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Band VIII, Heft 1–2, 1971.

LLIBOUTRY, L.: Traite de Glaciologie, Tome 2. Masson, Paris, 1965.

MEIER, M. F.: A Proposal for Mass-Balnce Terms. Part of a Draft Manual for the International Hydrological Decade, 1967.

OERTER, H. and H. MOSER: Water Storage and Drainage Within the Firn of a Temperate Glacier (Vernagtferner, Oetztal Alps, Austria). In: International Association of Hydrological Sciences, Publication No. 138, 1982.

OERTER, H., D. BAUER, H. MOSER and O. REINWARTH: Glacial-Hydrological Investigations at the Vernagtferner Glacier as a Basis for a Discharge Model. Nordic Hydrology, Bd. 12, 1981.

PATERSON, W. S. B.: The Physics of Glaciers. 2nd Edition, Pergamon, Oxford, 1981.

PEIPE, J., P. REISS und H. RENTSCH: Zur Anwendung des Digitalen Geländemodells in der Gletscherforschung. In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Bd. XIV, Heft 2, 1978.

SCHEIBNER, E. und W. MAHRINGER: Die Albedo der Sonnblickgletscher und ihre zeitlichen Variationen. In: Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, Band 16, 1968.

STEINHAUSER, F.: Die Meteorologie des Sonnblicks. 1. Teil. Springer Verlag, Wien 1938.

STROBL, J.: Erfassung der Einstrahlung mit Geländemodellen. Zur Berechnung der Verteilung topographisch gesteuerter Haushaltsgrößen mittels digitaler Geländemodelle am Beispiel der Hauptgletscher der Goldberggruppe. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Wien, 1983.

TOLLNER, H.: Die hydrographischen Verhältnisse im Einzugsgebiet des Wurten-Baches und ihre meteorologisch-klimatischen und glaziologischen Grundlagen. Unveröffentl. Gutachten für die Kärntner Elektrizitäts AG., 1961.

WILHELM, F.: Schnee- und Gletscherkunde. Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Band 8, W. de Gruyter, 1975.

YOUNG, G. J.: A Computer Program to Describe Terrain Characteristics of a Drainage Basin. Technical Bulletin No. 76, Environment Canada, Ottawa, 1973, a.

– : A Data Collection and Reduction System for Snow Accumulation Studies. Reprint Series No. 319. Environment Canada, 1973, b.

– : An Approach to Glacier Mass-balance Analysis Utilizing Terrain Characteristics. Scientific Series No. 60. Environment Canada, Ottawa, 1976.

YOUNG, G. J. and K. C. ARNOLD: Orthophotomaps of Glaciers. An Evaluation of an Automated Method Applied to Peyto Glacier, Alberta. Glaciology Division, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa, 1977.

Summary

An Analysis of the Changes in Three Adjacent Alpine Glaciers of the "Goldberggruppe" of the Hohe Tauern Range since 1930

The paper shows qualitative and quantitative methods of glaciology and their applications to the main glaciers of the "Goldberggruppe" which behaved quite differently during the investigated space of time. The paper tries to show the possibilities of description of the glaciers past and future behaviour. It begins with the easiest and most common measurements of the changes of position of the glacier-snouts but the main part deals with applications of cartography and cartometry to the area-, depth- and volume-changes. Special attention is directed to the colored glacier-comparison maps of different years which illustrate the different responses of different parts of the glaciers to the climatic changes during the past 50 years.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Mitteilungen der

Österreichischen Geographischen Gesellschaft

Jahr/Year: 1983

Band/Volume: 125

Autor(en)/Author(s): Böhm Reinhard, Hammer Norbert, Strobl Sepp (Josef)

Artikel/Article: Analyse der Veränderungen von drei benachbarten alpinen Gletschern in der

Goldberggruppe der Hohen Tauern seit 1930 116-151