

ABHANDLUNGEN

ANALYSE DER SCHNEEFLÄCHEN AUF GLETSCHERN DER TIROLER ZENTRALALPEN AUS LANDSAT-BILDERN

Von HELMUT ROTT, Innsbruck

Mit 9 Abbildungen und 2 Tabellen

ZUSAMMENFASSUNG

Von Landsat-1 wurde in den Jahren 1972 und 1973 die maximale Ausaperung der Gletscher in den Tiroler Zentralalpen erfaßt. Als Empfangsgerät diente der multispektrale Scanner (MSS) mit vier Kanälen zwischen 0,5 und 1,1 Mikrometern und einem Bodenauflösungsvermögen von etwa 80 Metern. Zur Kartierung der Schneeflächen wurden die MSS-Aufnahmen mit speziellen photographischen Verfahren auf einen Maßstab von 1:100.000 vergrößert. Unterschiede im Aussehen der Schneedecke in den vier MSS-Kanälen werden in Zusammenhang mit Bodenbeobachtungen diskutiert. Die Genauigkeit der Kartierung von Schnee- und Eisflächen aus Landsat-Bildern wurde auf 15 Gletschern einer Größe zwischen 1 und 10 km² mittels Flugzeugaufnahmen und Kartierung am Boden überprüft. Dabei wurde festgestellt, daß Landsat-Bilder bereits zur Kartierung von Schneeflächen auf Gletschern von wenigen km² Größe gut geeignet sind. Aus den Landsat-Aufnahmen wurde die Meereshöhe der Gleichgewichtslinie auf 53 Gletschern der Tiroler Zentralalpen bestimmt. Die regionalen Unterschiede in der Höhe der Gleichgewichtslinie wurden mit der regionalen Niederschlagsverteilung in Zusammenhang gebracht. Am Ende des Haushaltsjahres 1971/72 war die Gleichgewichtslinie mit der Nulllinie der Eisablation identisch und konnte deshalb direkt aus den Satellitenbildern bestimmt werden. Für 1968/69 wurde die Gleichgewichtslinie für zahlreiche Gletscher aus Luftbildern kartiert. 1972/73 war ein Jahr mit stark negativer Massenbilanz, die Gleichgewichtslinie verlief mitten durch das Firngebiet der Gletscher. Im September 1973 konnten deshalb aus den Landsat-Bildern nicht Akkumulations- und Ablationsflächen, sondern nur Schnee- und Eisflächen voneinander getrennt werden. Die Verhältnisse von Akkumulationsfläche bzw. Schneefläche zur Gesamtfläche wurden für Gletscher im Vorstoß und im Rückzug aus den Satelliten- und Luftbildern ausgewertet und mit der Massenbilanz in Zusammenhang gebracht. In den beiden Jahren mit negativer Massenbilanz unterschieden sich die Flächenverhältnisse der vorstoßenden Gletscher wesentlich von denen der Gletscher im Rückzug, während im Haushaltsjahr 1971/72 mit positiver oder ausgeglichener Massenbilanz die Unterschiede gering waren.

ANALYSIS OF SNOW COVER ON GLACIERS IN THE CENTRAL TYROLEAN ALPS FROM LANDSAT IMAGES

SUMMARY

The extent of snow cover at the end of the ablation season on glaciers in the Tyrolean Alps in 1972 and 1973 was determined from Landsat-1 Multispectral Scanner (MSS) images. For snow mapping the MSS-images with a ground resolution of 80 meters were enlarged to a scale of 1:100.000 by photographic methods. Different appearance of snow cover in the 4 MSS-channels is discussed in connection with ground truth control. The accuracy of snow and ice mapping from Landsat images was checked on 15 glaciers with an area from 1 to 10 km² by aerial photography and/or ground truth control. These comparisons imply the usefulness of Landsat images for snow mapping on glaciers of a few square kilometers.

The altitude of the equilibrium line was determined from Landsat images for 53 glaciers in the Tyrolean Alps. The regional differences in the equilibrium line altitude correspond to the regional precipitation patterns. The equilibrium line was identical with the snow

line at the end of the budget year 1971/1972; therefore it was possible to determine the equilibrium line from satellite images. For 1968/69 the equilibrium line was mapped from aerial photographs for several glaciers. In 1972/73 mass balance was strongly negative and the equilibrium line was within the firn area of the glaciers. Therefore it was not possible to distinguish between accumulation and ablation areas from the Landsat images of September 1973; however, snow and ice areas could be clearly differentiated. The ratios of accumulation area or snow area to the total area of the glaciers were determined from satellite images and aerial photography separately for advancing and for retreating glaciers and were related to the mass balance. In the budget years 1968/69 and 1972/73 with negative mass balance the accumulation area ratios of the advancing glaciers were clearly different from the ratios of the retreating glaciers, in 1971/72 with positive or balanced mass budget the differences between advancing and retreating glaciers were not significant.

ANALYSE DES SURFACES DE NEIGE SUR DES GLACIERS DES ALPES CENTRALES
DU TYROL À L'AIDE D'IMAGES DE LANDSAT

R É S U M É

L'extension de la couverture neigeuse a été déterminée à l'aide d'images MSS (multi-spectral scanner) de Landsat-1 dans les Alpes du Tyrol à la fin des périodes d'ablation de 1972 et 1973. Pour le relevé de la couverture neigeuse les images MSS avec une résolution de 80 m ont été agrandies à 1:100.000 par des méthodes photographiques. Les aspects différents de la couverture neigeuse dans les canaux 4 MSS sont discutés en rapport avec le contrôle au sol. La précision des relevés de la couverture neigeuse et de la glace à l'aide d'images de Landsat a été contrôlée sur 15 glaciers avec des surfaces de 1 à 10 km² par photographie aérienne et contrôle au sol. Ces comparaisons démontrent les avantages des images Landsat pour les relevés de la couverture neigeuse sur des glaciers d'une étendue de seulement quelques km².

L'altitude de la ligne d'équilibre a été déterminée à l'aide d'images de Landsat pour 53 glaciers des Alpes Tyroliennes. Les différences régionales de l'altitude de la ligne d'équilibre correspondent à la distribution de la précipitation régionale. La ligne d'équilibre a été identique à la ligne de neige à la fin de l'année budgétaire de 1971/72. A cause de ce fait la ligne d'équilibre a pu être déterminée à l'aide d'images de satellites. Pour l'année 1968/69 la ligne d'équilibre a été relevée à l'aide de photographies aériennes pour un grand nombre de glaciers. En 1972/73 le bilan de masse a été fortement négatif et la ligne d'équilibre se trouvait dans le névé des glaciers. De ce fait il n'était pas possible de distinguer entre les zones d'accumulation et d'ablation sur les images de Landsat du Septembre 1973. Les zones de neige et de glace cependant ont pu être identifiées nettement. Les aires d'accumulation ou de neige par rapport aux aires totales ont été déterminées à l'aide d'images de satellites et de photographies aériennes pour des glaciers en crue ou en recul et mises en corrélation avec le bilan de masse. Dans les deux années à bilan de masse négatif (1968/69 et 1972/73) les aires d'accumulation des glaciers en crue se distinguaient essentiellement des aires des glaciers en retraite tandis qu'en 1971/72 avec bilan de masse positif ou équilibré les différences étaient insignifiantes.

EINLEITUNG

Von den 80 Gletschern der österreichischen Alpen, deren Längenänderung im Jahre 1975 vermessen wurde, befanden sich 46 im Vorstoß, 34 zeigten stationäres Verhalten oder waren im Rückzug (Kinzl, 1975). Von fünf Gletschern wird seit mehreren Jahren die jährliche Änderung der Massenbilanz bestimmt. Ein direkter Schluß vom Massenhaushalt der untersuchten Gletscher auf die Massenänderung der übrigen Gletscher eines Gebietes ist wegen des stark unterschiedlichen Verhaltens der einzelnen Gletscher nicht möglich. Jedoch erlaubt die Kenntnis von Akkumulations- und Ablationsflächen am Ende eines Haushaltsjahres eine grobe Abschätzung der Massenbilanz eines Gletschers (Hoinkes, 1970). Ein Schritt zur Erfassung dieser Flächen über ein größeres Gebiet war die Luftaufnahme sämtlicher Gletscher in

den österreichischen Alpen, die im Spätsommer und Herbst 1969 vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, für die Erstellung des österreichischen Gletscherinventars durchgeführt wurde. Aus der Luftaufnahme werden sämtliche Gletscherflächen neu bestimmt und für zahlreiche Gletscher auch die Akkumulations- und Ablationsflächen ausgewertet, soweit eine teilweise Neuschneeaufgabe zum Aufnahmezeitpunkt die Unterscheidung dieser Flächen zuließ. Neben den kostspieligeren Luftaufnahmen mit arbeitsintensiver Auswertung gibt es seit dem Start des Landsat (früher ERTS, Earth Resources Technology Satellite, genannt) eine kostensparende, wenn auch zufolge des Auflösungsvermögens weniger genaue Möglichkeit, Schnee- und Eisflächen auf Gletschern zu bestimmen. Die Genauigkeit der Landsat-Bilder ist zur Kartierung auf Gletschern mit einer Größe von wenigen Quadratkilometern ausreichend, wie durch Vergleich mit Flugzeugaufnahmen und Kartierung vom Boden aus festgestellt wurde. In den Jahren 1972 und 1973 wurde von Landsat-1 die maximale Ausaperung der Gletscher der Tiroler Zentralalpen erfaßt. Aus diesen Aufnahmen wurden die Schnee- und Eisflächen sowie die Höhe der Schneegrenzen¹ auf 53 Gletschern der Zillertaler, Stubai- und Ötztaler Alpen nördlich und südlich des Alpenhauptkammes bestimmt.

ANGABEN ÜBER LANDSAT UND BILDEMPFÄNGER

Im Juli 1972 wurde Landsat-1 gestartet, gefolgt von Landsat-2 im Februar 1975. Landsat hat eine polnahe, kreisförmige Umlaufbahn in 910 km Höhe, die eine Aufnahme desselben Gebietes der Erdoberfläche in Abständen von 18 Tagen erlaubt, wobei in einem Umlauf ein Streifen der Erdoberfläche von 185 km Breite aufgenommen wird. In höheren Breiten erhält man durch Überlappung Bilder desselben Punktes an aufeinanderfolgenden Tagen, in 40° Breite beträgt die Überlappung 34 Prozent, in 60° Breite 57 Prozent. Der Umlauf ist sonnensynchron, wobei der Äquator bei jedem Umlauf um etwa 9.40 Uhr Sonnenzeit überflogen wird (Rango et al., 1974, Wiesnet, 1974).

Als Bildempfänger ist der Multispektrale Scanner (MSS) auf dem Landsat in Betrieb; die Abtastung der Erdoberfläche erfolgt in folgenden vier Spektralbereichen im Sichtbaren und nahen Infrarot: Kanal 4 (0,5–0,6 μm), Kanal 5 (0,6–0,7 μm), Kanal 6 (0,7–0,8 μm), Kanal 7 (0,8–1,1 μm). Ein Bildpunkt des MSS entspricht auf der Erdoberfläche einer Fläche von 60 \times 80 m. Die Bilder werden entweder direkt von Bodenstationen empfangen oder an Bord gespeichert und im Bereich der Empfangsstationen übertragen. Die Magnetbandspeicherung ist auf Landsat-1 im Gegensatz zu Landsat-2 nicht mehr im Betrieb. Die Aufnahme desselben Gebietes erfolgt in Abständen von 18 Tagen; im Empfangsbereich der Bodenstationen ist durch den zweiten Satelliten alle neun Tage eine Aufnahme möglich. Die Wiederholungsrate stellt in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung für viele praktische Anwendungen eine Einschränkung dar. In ungünstigen Fällen kann es sein, daß man wegen der Wolken mehrere Monate hindurch keine brauchbaren Bilder eines Gebietes erhält. Die Daten der Bilder sind auf Magnetbändern oder in photographischer Form vom US Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota 57198, erhältlich.

¹ Mit dem Begriff Schneegrenze wird in dieser Arbeit allgemein die Trennungslinie zwischen schneebedecktem und schneefreiem Gebiet bezeichnet.

AUSWERTUNG DER SATELLITENDATEN

Zur Kartierung von Schneeflächen aus Landsat-Bildern sind verschiedene Methoden in Verwendung (Meier, 1975, Meier and Evans, 1975). Die manuellen und optischen Methoden beruhen im wesentlichen auf der Unterscheidungsfähigkeit des menschlichen Auges, spezielle photographische Ausarbeitung der Bilder kann die Unterscheidung einzelner Graustufen erleichtern. Mit elektronischen Bildanalysegeräten ist die Auswertung von photographischen Wiedergaben und teilweise auch von Magnetbändern möglich, wobei der Auswertende eine interaktive Rolle innehat. Weiters gibt es noch rein digitale Auswertemethoden, die eine digitale Rechenanlage zur Auswertung der Magnetbänder notwendig machen. Im Gebirge wird die Bildauswertung durch die Topographie erschwert. So nehmen z. B. die Graustufen von Schnee, Eis und aperem Gelände je nach Exposition, Sonnenstand und Verschmutzungsgrad in verschiedenen Teilen eines Gebietes und zu verschiedenen Jahreszeiten unterschiedliche Werte an. Auch auf einem einzelnen Gletscher können gleichalthe Schneeflächen bei Unterschieden in Exposition und Verschmutzungsgrad durch unterschiedliche Grauwerte gegeben sein.

Für die vorliegende Arbeit wurden die Schneeflächen auf den größeren Gletschern der Tiroler Zentralalpen zu zwei verschiedenen Terminen kartiert. Da keine elektronischen Bildanalysegeräte zur Verfügung standen und wegen des wesentlich geringeren Zeitaufwandes gegenüber digitaler Bildauswertung wurden manuelle Analysemethoden angewandt. Die manuellen Methoden bedeuten für die Kartierung der Schneeflächen auf Gletschern keinen nennenswerten Verlust an Genauigkeit, da die Schneegrenzen auf den Gletschern durch relativ glatte und deutliche Linien gegeben sind und Probleme durch Vegetation wie z. B. Wald wegfallen. Mit photographischen Methoden wurden die Schneegrenzen verdeutlicht und auf einen zur Auswertung geeigneten Maßstab vergrößert. Um das geeignetere Verfahren festzustellen, wurden die MSS-Bilder auf zwei verschiedene Filmtypen umkopiert, auf lithographischen Film und auf Agfacontour Professional Film. Mit dem lithographischen Film kann man den Kontrast zwischen schneebedecktem und schneefreiem Gebiet wesentlich erhöhen; man erhält je nach Bearbeitung eine reine Schwarzweiß-Darstellung oder auch verschiedene Graustufen. Mit dem Agfacontour-Film kann man die Linien gleicher Dichte (gleichen Grautons) wiedergeben, d. h. man erhält bei entsprechender Belichtung die Schneegrenze als Linie, falls sie durch eine bestimmte Graustufe gegeben ist. Die über diese beiden photographischen Verfahren ermittelten Schneeflächen waren auf den Gletschern nahezu identisch. Der lithographische Film hat den Vorteil, daß er beim Umkopieren und in der Auswertung etwas leichter zu handhaben ist und wegen der Topographie entstandene Unterschiede im Grauton des Schnees weniger Schwierigkeiten bereiten als beim Agfacontour-Film.

Die Abbildungen 1 und 2 enthalten Beispiele der bearbeiteten Landsat-Bilder, die für die Kartierung der Schneebedeckung der Gletscher in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. In den Abbildungen sieht man einen Teil der Ötztaler Alpen, der aus dem Landsat-Bild Nr. E-1417-09372 vom 13. September 1973 herausvergrößert wurde. Abbildung 1 ist eine Vergrößerung aus dem MSS-Kanal 5 (0,6 bis 0,7 μm), in dem Schnee ein höheres Reflexionsvermögen hat als im nahen Infrarot (Kanal 7). Abbildung 2 zeigt denselben Bildausschnitt im Kanal 7 (0,8–1,1 μm), das Bild ist mit lithographischem Film kontrastreich ausgearbeitet, um die Schneeflächen hervorzuheben. Das Eis hat in diesem Kanal ungefähr das gleiche Reflexions-

vermögen wie das umliegende Felsgelände und unterscheidet sich deutlicher vom Schnee als im Kanal 5. Teilweise erscheinen die sonnenbeschienenen Hänge heller als das Gletschereis, wie z. B. die Hänge westlich von Vent (V in Abb. 2). Ausschnitte der Landsat-Bilder wurden photographisch auf einen Maßstab von 1:100.000 vergrößert. Aus den Vergrößerungen wurde mit Hilfe einer durchsichtigen Astralozfolie, die Schichtlinien und Gewässer einer Karte im Maßstab 1:100.000 enthält, die Schneegrenzen kartiert. Da die Gletscherstände dieser Karte mehrere Jahrzehnte alt sind, mußten die Schneeflächen auf Karten im Maßstab 1:25.000 oder 1:50.000 mit aktuellen Gletscherständen übertragen werden. Der Zwischenschritt über die durchsichtige Folie ist bei der Kartierung nicht nötig, wenn man die Vergrößerungen mit lithographischem Film so ausarbeitet, daß man Landmarken wie Gipfel, Grate und Taleinschnitte noch erkennen kann. In der Festlegung der Schneegrenze gibt es Fehlermöglichkeiten bei allen Auswertemethoden, sei es, daß bestimmte Grautöne als Schneeflächen gewählt werden oder eine bestimmte Helligkeitsabstufung als Schneegrenze definiert wird oder auch daß multispektrale Analysen der digitalen Daten aus mehreren MSS-Kanälen durchgeführt werden. Für Hänge mit stark unterschiedlicher Exposition müssen die Änderungen in den Graustufen zufolge der Intensitätsunterschiede der einfallenden Strahlung beachtet werden. Bei großem Helligkeitsunterschied zwischen Schnee und schneefreiem Gebiet und bei glattem Verlauf der Schneegrenze im Gelände ist die Festlegung der Schneegrenze aus den Bildern unproblematisch. Bei verschmutztem Schnee, dessen Reflexionsvermögen ähnlich dem vom Eis sein kann, ist die Unterscheidung schwieriger; im nahen Infrarot (Kanal 7) ist der Kontrast zwischen Schnee und Eis größer als im Sichtbaren und reicht im allgemeinen zur eindeutigen Trennung aus. Zur Bestimmung der Schneegrenzen in dieser Arbeit wurde zum Großteil Kanal 7 verwendet, nur auf stärker geneigten, sonnenabgewandten Hängen wurde Kanal 5 benutzt, da der Kontrast auf den Hängen mit geringer Einstrahlung im Kanal 5 größer war als im Kanal 7. Die Schattenstellen nahmen einen so geringen Teil eines Bildes ein, daß die Schneegrenzen für diese Stellen leicht extrapoliert werden konnten. Neben Expositionsunterschieden bereiten auch die Flächen mit teilweiser Schneebedeckung Schwierigkeiten. Ein Bildpunkt gibt den mittleren Grauwert einer Fläche von 60×80 m wieder. Ab einer gewissen Helligkeit des Punktes wird diese Fläche als schneebedeckt aufgefaßt, auch wenn sie nicht zu 100% mit Schnee bedeckt ist. Je nach Bearbeitung des Materials und nach MSS-Kanal können sich deshalb Unterschiede im Verlauf der Schneegrenze ergeben. Im Hochgebirge sind die Zonen, in denen die Schneebedeckung auf kleinem Raum zwischen etwa 25 Prozent und 75 Prozent der Fläche einnimmt und die man nicht eindeutig schneefrei oder schneebedeckt nennen kann, auf einen kleinen Höhenbereich beschränkt und fallen vor allem auf Gletschern kaum ins Gewicht.

Wenn man z. B. aus Kanal 5 ($0,6-0,7 \mu\text{m}$) und Kanal 7 ($0,8-1,1 \mu\text{m}$) die Linie mit dem stärksten Helligkeitsunterschied als Schneegrenze auffaßt, erhält man in den Randbereichen der Schneedecke im allgemeinen Unterschiede, im Kanal 7 erscheint die Ausdehnung der Schneedecke geringer. Kanal 6 ($0,7-0,8 \mu\text{m}$) ergibt einen Mittelwert, der näher bei der Schneebedeckung von Kanal 5 liegt. Als Beispiel dafür dienen die Abb. 3 u. 4, die aus dem Landsat-Bild vom 28. Mai 1973, Bild Nr. E-1309-09385, im Kanal 5 und Kanal 7 einen Ausschnitt von ungefähr 20×30 km aus den Ötztaler Alpen wiedergeben. Die Täler (von West nach Ost: Kaunertal mit Gepatschstausee, Pitztal, Ötztal mit Ventertal und Gurglertal) sind schneefrei,

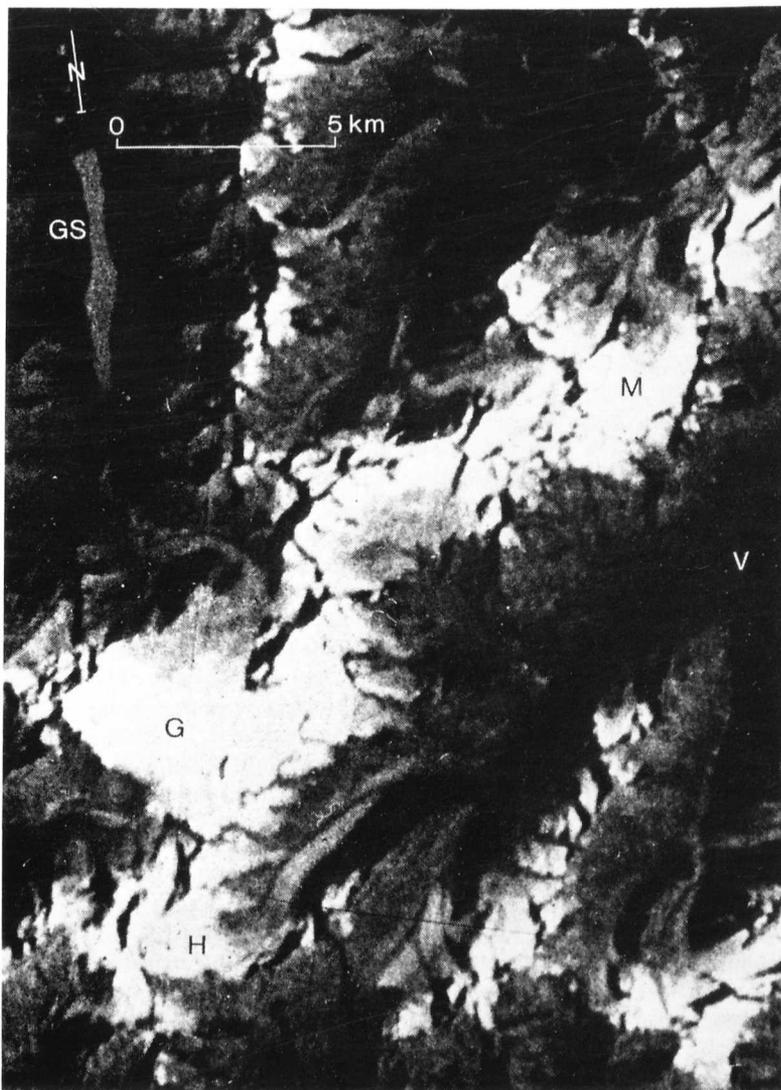


Abb. 1: Teil der Ötztaler Alpen, vergrößert aus dem Landsat-1, Bild Nr. E-1417-09372 vom 13. September 1973, MSS-Kanal 5 ($0,6-0,7 \mu\text{m}$) (GS = Gepatschstausee, G = Gepatschferner, H = Hintereisferner, M = Mittelbergferner, V = Vent).

in den hochgelegenen Seitentälern des Gurglertales liegt im Talboden Schnee, während die steilen Bergflanken schneefrei sind. Die temporäre Schneegrenze tritt an den Berghängen deutlich hervor, wobei der Kontrast zwischen Schnee und schneefreiem Gelände entsprechend dem höheren Reflexionsvermögen im Kanal 5 größer ist als im Kanal 7. Die einzelnen Cumuli kann man infolge ihrer Schatten vom Schnee deutlich unterscheiden. Die Schneefläche erscheint im Kanal 7 in ihrem

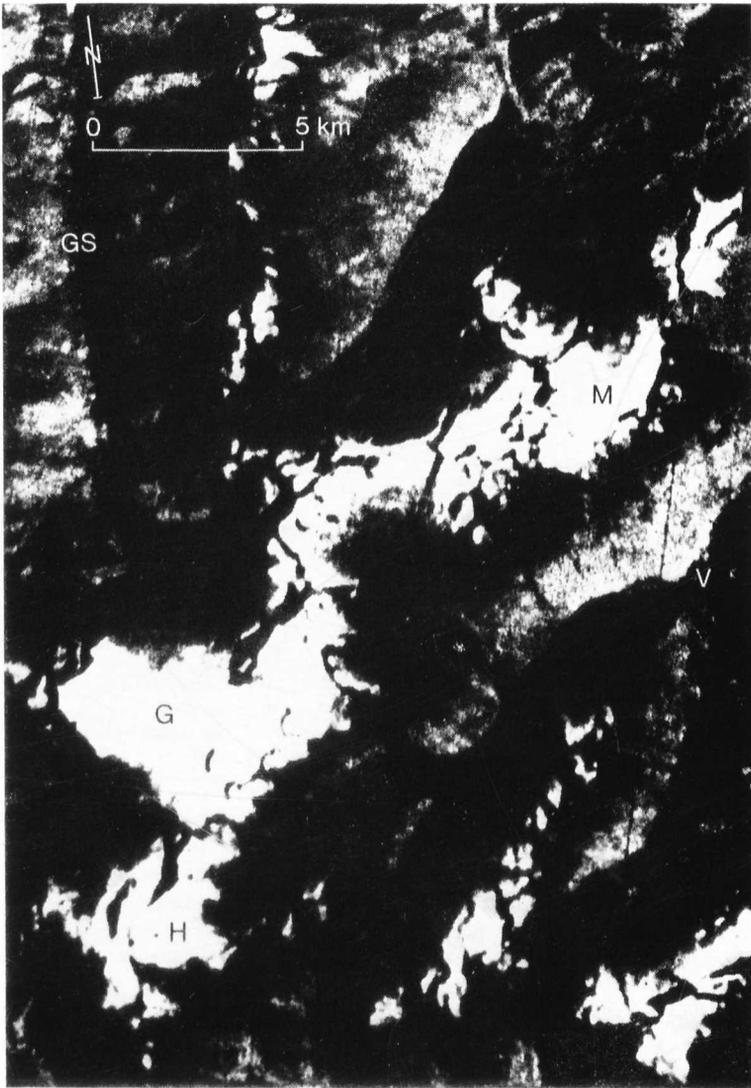


Abb. 2: Bildausschnitt wie Abb. 1, MSS-Kanal 7 ($0,8-1,1 \mu\text{m}$) mit lithographischem Film kontrastreich ausgearbeitet.

Randbereich weniger ausgedehnt als im Kanal 5. Nach Bodenbeobachtungen setzte sich die Schneedecke in allen Höhenlagen aus grobkörnigem, verschmutztem, nassem Schnee zusammen.

Wie aus Vergleich mit Photographien vom Boden im Rofental und im Bereich des Hintereisferners (H in Abb. 3) festgestellt wurde, traten die Unterschiede zwischen den beiden Kanälen im Randbereich der Schneedecke bei Flächen mit nur teilweiser Schneebedeckung auf. In der Gegend des Langtalferners (L in Abb. 3) im Gurglertal



Abb. 3: Teil der Ötztaler Alpen, vergrößert aus dem Landsat-1, Bild Nr. E-1309-09385 vom 28. Mai 1973, MSS-Kanal 5 ($0,6-0,7 \mu\text{m}$) (G = Gepatschferner, H = Hintereisferner, L = Langtalerferner, V = Vent, O = Obergurgl).

kann man den Gletscher im Kanal 7 im Gegensatz zu Kanal 5 deutlich vom Vorfeld unterscheiden, das nur teilweise schneebedeckt ist.

Der Unterschied zwischen den beiden Kanälen wurde häufig damit erklärt, daß bei uneinheitlicher Schneebeschaffenheit im Kanal 5 die gesamte Schneedecke erfaßt wird, während im Kanal 7 nur der trockene Schnee sehr hell wiedergegeben wird, die Flächendifferenz zwischen beiden Kanälen somit schmelzenden (oder geschmolzenen und wiedergefrorenen) Schnee erfaßt (Haefner und Seidel, 1974, Barnes et al., 1974). Als Begründung dafür dient das relativ starke Absorptionsvermögen von nassem Schnee im nahen Infrarot; nasser Schnee erscheint im Kanal 7 oft nicht wesentlich heller als das schneefreie Gelände. Nach Messungen von O'Brien and Munis (1973) an sauberem Schnee unterschiedlicher Struktur und verschiedenen Alters ist im Bereich von $0,6$ bis $0,7 \mu\text{m}$ das Reflexionsvermögen von trockenem Schnee um 5 bis 10%, im Bereich von $0,8$ bis $1,1 \mu\text{m}$ um 10 bis 15% höher als das Reflexionsvermögen von nassem Schnee bzw. wiedergefrorenem Schnee, der sich ähnlich wie nasser Schnee verhält. Bei $1 \mu\text{m}$ ist das Reflexionsvermögen von Schnee ungefähr halb so groß wie bei $0,5 \mu\text{m}$ (Dirmhirn, 1957, 1964; O'Brien and Munis, 1973).

Häufig sind allerdings die Differenzen in der Ausdehnung der Schneedecke aus Kanal 5 und aus Kanal 7 nicht über Unterschiede in der Schneebeschaffenheit zu erklären, sondern über die in beiden Kanälen unterschiedlichen Kontraste von

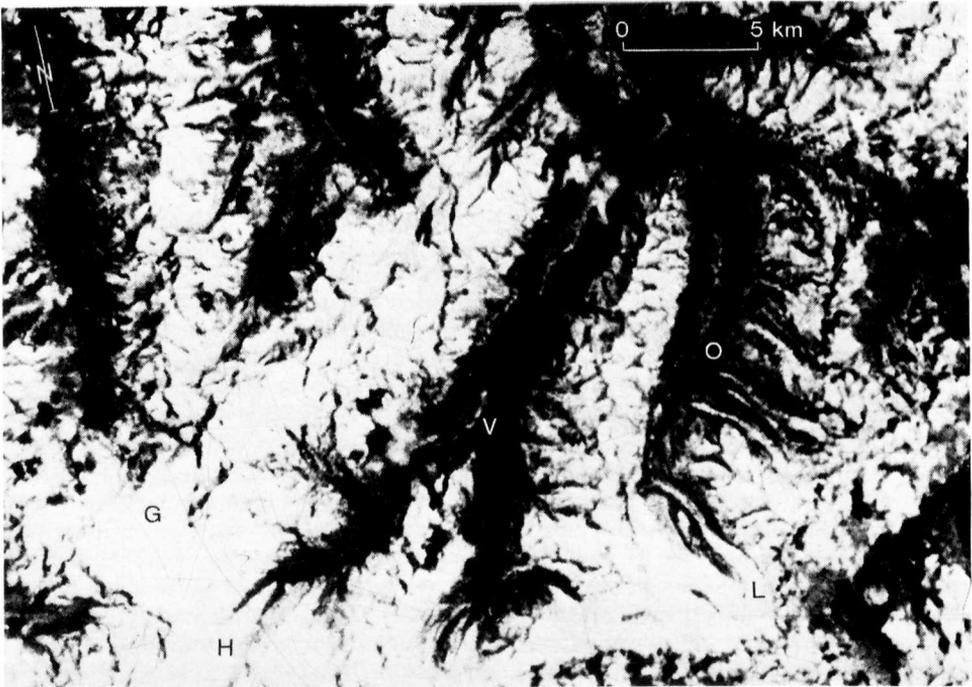


Abb. 4: Bildausschnitt wie Abb. 3, MSS-Kanal 7 ($0,8-1,1 \mu\text{m}$).

Flächen mit teilweiser Schneebedeckung zur Umgebung. Dafür sprachen nicht nur die Landsat-Bilder vom 28. Mai 1973 (Abb. 3, 4), sondern auch die Vergleiche der Satellitenbilder vom 31. August 1972, 6. Oktober 1972 und 13. September 1973 mit Bodenbeobachtungen in verschiedenen Gebieten der Tiroler Zentralalpen. Zu diesem Schluß kann man auch durch die im folgenden ausgeführte Überlegung gelangen. Während das Reflexionsvermögen von sauberem Altschnee im Bereich $0,8$ bis $1,1 \mu\text{m}$ (MSS 7) ungefähr die Hälfte des Reflexionsvermögens im Bereich $0,6$ bis $0,7 \mu\text{m}$ beträgt, nimmt das Reflexionsvermögen von Gesteinen und Sand mit der Wellenlänge schwach zu. Nach den Messungen von Dirmhirn (1957, 1964) erhält man z. B. für das Reflexionsvermögen von dunklem Gneis im MSS-5-Bereich einen Wert von 24 Prozent, im MSS-7-Bereich einen Wert von 28 Prozent; für die im inneren Ötztal weit verbreiteten Paragneise und Glimmerschiefer sollten keine wesentlichen anderen Werte gelten. Wenn man der spektralen Reflexionskurve die spektrale Energieverteilung der Globalstrahlung überlagert, erhält man die im jeweiligen Spektralbereich reflektierte Energie. Während im Bereich des MSS-5 sauberer Altschnee ungefähr dreimal so viel Energie reflektiert wie Gneis, ist es im MSS-7-Bereich nur mehr 1,3 bis 1,5 mal mehr. Angenommen 25 Prozent des Bodens sind schneebedeckt, so erscheint das teilweise schneebedeckte Gelände im MSS-5-Bereich noch wesentlich heller als die Umgebung, während im MSS-7-Bereich der Unterschied nur mehr gering ist. Der Kontrast im nahen Infrarot wird unter Umständen noch durch Verschmutzung des Schnees verringert oder dadurch, daß die

aperen Flecken zwischen dem Schnee feucht oder naß sind und nasser Boden im nahen Infrarot ein geringeres Reflexionsvermögen hat als trockener Boden. Auf Grund des spektralen Reflexionsverhaltens erscheinen die Schattenzonen im Kanal 7 (Abb. 4) gegenüber Kanal 5 (Abb. 3) vergrößert. Bei flachem Einfall der Sonnenstrahlung wird auf steilen nord- bis westseitigen Hängen entsprechend der Tageszeit der Aufnahme vom Schnee nicht mehr Strahlung reflektiert als von horizontalem oder sonnseitigem schneefreiem Gelände.

Neben der reflektierten Energie und der spektralen Empfindlichkeit des Empfangsgerätes ist auch die Art der Wiedergabe von wesentlicher Bedeutung für die Helligkeitsunterschiede. In der photographischen Wiedergabe der MSS-Daten kann man bis zu 15 Graustufen unterscheiden. Wegen dieser begrenzten Zahl von Graustufen sind für die stark reflektierenden Medien nur wenige Graustufen reserviert. Deshalb fallen häufig Schneeflächen mit unterschiedlicher Albedo und auch teilweise schneebedecktes Gebiet, besonders bei steilem Sonneneinfall, im Kanal 5 in denselben Graubereich und können nicht getrennt werden. Im Kanal 7 nimmt der Schnee seltener als in den anderen Kanälen den äußersten Helligkeitsbereich ein, häufig ist noch innerhalb des schneebedeckten Gebietes eine Unterscheidung nach Graustufen (Verschmutzung, Hangneigung) möglich. Auf den Magnetbändern, in denen ein Kanal in 64 Graustufen unterteilt wird, sind auch im MSS-5-Bereich innerhalb einer Schneedecke mehrere Graustufen zu unterscheiden (Østrem, 1974a). Für die im folgenden besprochene Kartierung der Schneeflächen auf Gletschern wurde wegen dem größeren Kontrast zwischen Schnee und Eis der MSS-Kanal 7 verwendet, zur Kontrolle weiters noch der Kanal 6 und auf steilen, der Sonne abgewandten Gletschern Kanal 5. Bei Kartierung aus den verschiedenen Kanälen ergaben sich für diese Anwendung nur geringe Unterschiede, da die Schneegrenzen auf den Gletschern im allgemeinen durch relativ glatte Linien gegeben sind.

VERGLEICH DER SATELLITENDATEN MIT BODENBEOBACHTUNGEN

Die Kenntnis der Schnee- und Eisflächen eines Gletschers am Ende eines Haushaltsjahres ist für verschiedene glaziologische und hydrologische Untersuchungen von großer Bedeutung. Von 1972 bis 1975 konnte von Landsat in zwei Jahren die maximale Ausdehnung der Gletscher in den Tiroler Zentralalpen erfaßt werden, und zwar in den MSS-Aufnahmen am 31. August 1972 und am 13. September 1973. Aus der Landsat-Aufnahme vom 13. September 1973 sind Bildauschnitte in Abb. 1 und Abb. 2 wiedergegeben. Die Eignung dieser Satellitenbilder zur Bestimmung der Schnee- und Eisflächen auf den Gletschern der Ötztaler, Stubai- und Zillertaler Alpen wird im folgenden im Vergleich mit Bodenbeobachtungen und Schrägaufnahmen aus der Luft dargelegt.

1972 waren die Voraussetzungen dafür günstig, Akkumulations- und Ablationsflächen von der Luft aus zu unterscheiden, da die Gleichgewichtslinie am Ende des Haushaltsjahres tiefer lag als in einem der drei vorangegangenen Jahre. Die Grenzlinie zwischen Gletschereis und Altschnee am Ende des Haushaltsjahres war deshalb weitgehend mit der Gleichgewichtslinie identisch, wenn man von der geringfügigen Neuschneeaufgabe von Ende September und der schmalen Zone von aufgefrorenem Eis absieht. Es galt somit die Frage zu klären, wieweit sich die temporäre Schneelinie vom 31. August 1972 bis zum 30. September 1972 (Ende des hydrologischen Haushaltsjahres) verändert hat. Zur Überprüfung standen die eingehenden Massen-

haushaltsstudien am Hintereisferner (9 km²) und am Kesselwandferner (4 km²) in den Öztaler Alpen zur Verfügung.

Am Hintereisferner wurden am 1. September 1972, einen Tag nach der Aufnahme des Satellitenbildes, zahlreiche Photos vom Boden aus gemacht und daraus die temporäre Schneelinie kartiert. Die Differenz zwischen der vom Boden und der über den Satelliten kartierten temporären Schneelinie war an keiner Stelle größer als 100 m, was in diesem Gebiet einer Höhendifferenz von 10 bis 20 m entspricht. Im September 1972 fand zwischen Neuschneefällen Anfang und Mitte des Monats nur äußerst geringe Ablation im Bereich der Schneegrenze statt, so daß sich die temporäre Schneelinie, abgesehen vom Neuschnee, im Laufe des Septembers kaum verändert hat. Die temporäre Schneelinie am 31. August entsprach somit weitgehend der Altschneelinie, der Trennungslinie zwischen Akkumulations- und Ablationsfläche am Ende des Haushaltsjahres.

Aus den Massenhaushaltsuntersuchungen wurde für das Haushaltsjahr 1971/72 das Verhältnis von Akkumulationsfläche zur Gesamtfläche (S_c/S) des Hintereisferners zu 0,66 bestimmt, aus dem Satellitenbild vom 31. August 1972 ergab sich ein Wert von 0,70. Der Unterschied von 4 Prozent der Gesamtfläche ist durch mehrere kleinräumige Ablationsflächen innerhalb des Firngebietes, vor allem in steilen Bruchzonen bedingt, die aus dem Satellitenbild nicht zu entnehmen sind. Für den Kesselwandferner sieht der Vergleich noch günstiger aus, dort wurde aus den Bodenmessungen $S_c/S = 0,85$ bestimmt, aus dem Satellitenbild erhielt man einen Wert von 0,86. Am Kesselwandferner war in diesem Haushaltsjahr oberhalb der Altschneelinie nur eine kleine Ablationsfläche vorhanden. Diesen Vergleichen, wie auch den Witterungsverhältnissen im September zufolge, sollten sich die Flächenanteile der Akkumulationsgebiete auf den Tiroler Gletschern vom 31. August 1972 bis zum 30. September 1972 nur um wenige Prozent oder überhaupt nicht verringert haben.

Im Gegensatz zum Jahre 1972, in dem die Grenze zwischen Schnee und Eis auch die Grenze zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet war, brachte das darauffolgende Jahr schwierigere Bedingungen zur Bestimmung von Akkumulations- und Ablationsflächen aus der Luft. Am Ende des Haushaltsjahres 1972/73, das in der 23jährigen Massenhaushaltsreihe des Hintereisferners zusammen mit dem Haushaltsjahr 1963/64 den negativsten Wert der Massenbilanz ergab, verlief die Gleichgewichtslinie mitten durch das Firngebiet. Ein Beispiel für die Verhältnisse auf den ostalpinen Gletschern in diesem Jahr bringt die Abbildung 5, eine Luftaufnahme vom Gurgler Ferner in den Öztaler Alpen am 14. September 1973. Die helle Schneefläche entspricht nicht dem Akkumulationsgebiet von 1972/73, sondern setzt sich aus Schnee aus dem laufenden Haushaltsjahr 1972/73 und aus sauberem Firn aus dem Haushaltsjahr 1971/72 zusammen; d. h. die Gleichgewichtslinie verläuft mitten durch die helle Schneefläche. Unterhalb des Firns aus 1971/72 folgt stark verschmutzter Firn, der aus dem Jahr 1969 und aus den Jahren davor stammt. Der verschmutzte Firn hat ein Reflexionsvermögen, das dem von Gletschereis ähnlich ist und teilweise sogar darunter liegt. Unterhalb des Firns schließt eine Zone von aufgefrorenem Eis aus mehreren Jahren an.

In Jahren, in denen die Gleichgewichtslinie nicht mit der Nulllinie der Eisablation übereinstimmt, kann man die Gleichgewichtslinie nur mittels sorgfältiger Untersuchungen am Gletscher eindeutig bestimmen. Aus einem Satellitenbild ist die Bestimmung in diesen Jahren nicht möglich, was bei der Anwendung von Landsat-Bildern zur Abschätzung des Massenhaushaltes (Østrem, 1974b, 1975) in Betracht



Abb. 5: Östlicher Teil des Gurgler Ferners (Ötztaler Alpen). Photo G. Patzelt vom 14. September 1973.

zu ziehen ist. Aus Luftaufnahmen kann man zwischen Altschnee aus dem laufenden Haushaltsjahr und Firnschnee früherer Jahre eher unterscheiden, da der Schnee aus verschiedenen Jahren häufig verschieden stark verschmutzt ist oder zwischen den Schneeflächen aus verschiedenen Jahren Schmutzhorizonte zu erkennen sind. Erschwerend für diese Analysen wirken sich Neuschneefälle im Laufe der Ablationsperioden aus. Für die Analyse der Linien innerhalb der Firngebiete aus Luftaufnahmen sind laufende Bodenbeobachtungen an einzelnen Gletschern des zu untersuchenden Gebietes Voraussetzung.

Wie groß der Unterschied zwischen der Akkumulationsfläche und der aus Flugaufnahmen erkennbaren Schneefläche sein kann, verdeutlicht Abbildung 6 am Beispiel des Hintereisferners in den Ötztaler Alpen. Die gesamte graue Fläche, die 47 Prozent der Fläche des Hintereisferners einnimmt, entspricht der Fläche des hellen Schnees, wie sie aus Flugzeugaufnahmen und Photographien am Boden am 13. und 14. September 1973 kartiert wurde. Die weiße Fläche wird von stark verschmutztem Firn und von Eis eingenommen. Die dunkelgraue Fläche ist die aus Massenhaushaltsuntersuchungen bestimmte Akkumulationsfläche am Ende des Haushaltsjahres 1972/73, sie nimmt nur 24 Prozent der Gletscherfläche ein. In Abbildung 7 entspricht die dunkelgraue Fläche der Fläche des relativ sauberen Schnees am Hintereisferner, wie sie aus der Landsat-Aufnahme vom 13. September 1973 kartiert wurde und vom restlichen Teil des Gletschers deutlich zu unterscheiden war. Diese Fläche setzt sich

aus Altschnee des laufenden Haushaltsjahres 1972/73 und Firn von 1971/72 zusammen, wie den Untersuchungen am Boden zu entnehmen war. Da sich der Verlauf von Firngrenze und temporärer Schneelinie vom 13. September 1973 bis zum 30. September 1973 nicht änderte, stellt diese Fläche die Netto-Akkumulationsfläche für den Zeitraum 1. Oktober 1971 bis 30. September 1973 dar; im folgenden wird dafür die Abkürzung $S_c(72 + 73)$ verwendet. Über Boden- und Luftaufnahmen wurden $S_c(72 + 73)$ zur Gesamtfläche S für den Hintereisferner $S_c(72 + 73)/S = 0,47$ bestimmt (Abb. 6), aus der Landsat-Aufnahme $S_c(72 + 73)/S = 0,51$ (Abb. 7). Der Unterschied in den beiden Flächenverhältnissen von 4 Prozent der Gesamtfläche erklärt sich aus dem begrenzten Auflösungsvermögen des MSS und den Genauigkeitsgrenzen in der Kartierung. Außer der hellen Schneefläche $S_c(72 + 73)$ kann man am Hauptteil des Hintereisferners aus dem Landsat-Bild noch andere Zonen durch feine Abstufungen im Grauton erkennen, die sich nicht so stark vom Eis unterscheiden wie $S_c(72 + 73)$. An den relativ sauberen Firn von 1971/72 schließt der verschmutzte Firn an, der aus dem Haushaltsjahr 1968/69 und früheren Jahren stammt, wie man aus der Lage der Gleichgewichtslinie im Herbst 1970 und 1971 schließen kann. Diesem verschmutzten Firn entspricht die hellgraue Fläche in Abbildung 7; der Firn dieser Fläche hatte in den Spektralbereichen der Kanäle 6 und 7 ungefähr das gleiche Reflexionsvermögen wie das Gletschereis im mittleren Bereich der Zunge. Die Zone darunter, die in der Abbildung 7 in einem mittleren Grauton wiedergegeben ist, besteht aus stark verschmutztem Firn, der in allen Kanälen ein etwas geringeres Reflexionsvermögen als das Eis hat. Der stark verschmutzte Firn kommt in seinen Dichtewerten dem Eis nahe und dürfte aus dem stark positiven Haushaltsjahr 1964/65 stammen. Diese Zone des stark verschmutzten Firns erschien auch vom Boden aus dunkler als das Eis unterhalb. Auf den meisten anderen Gletschern nahm die Zone des verschmutzten Firns im Herbst 1973 einen wesentlich geringeren Flächenanteil ein als am Hintereisferner.

Für den Kesselwandferner, der wie der Hintereisferner im Rofental liegt, wurde das Flächenverhältnis $S_c(72 + 73)/S = 0,74$ aus Luftaufnahmen vom 14. September 1973 bestimmt, aus der Landsat-Aufnahme zu 0,78. Der Unterschied von 4 Prozent resultiert wie beim Hintereisferner im wesentlichen aus kleinen Eisflächen innerhalb des Schnees, die wegen des Auflösungsvermögens in den Landsat-Bildern nicht zu erkennen sind. Das aus den Massenhaushaltsuntersuchungen bestimmte Akkumulationsgebiet nahm am Kesselwandferner am Ende des Haushaltsjahres 1972/73 63 Prozent der Gletscherfläche ein, was einen wesentlich höheren Wert gegenüber dem Hintereisferner mit 24 Prozent der Fläche bedeutet.

Für die Landsat-Aufnahme vom 13. September 1973 war an insgesamt 15 Gletschern der Tiroler Zentralalpen mit einer Fläche zwischen 1 und 10 km² eine Überprüfung möglich. Die Ausaperung zahlreicher Stubai- und Ötztaler Gletscher wurde am 14. September 1973 vom Flugzeug aus fotografiert und in Karten eingezeichnet, für drei Zillertaler Gletscher standen Aufnahmen vom Boden zur Verfügung. Zu Vergleichszwecken wurden die Gletscher in zwei Gruppen unterteilt. Sechs Gletscher fielen in die Gruppe zwischen 1 und 3 km² Größe; für diese Gletscher lag das Flächenverhältnis $S_c(72 + 73)/S$ aus dem Satellitenbild im Mittel 2 Prozent der Gletscherfläche über dem Flächenverhältnis aus Boden- und Luftaufnahmen, die maximale Abweichung war auf einem Gletscher 8 Prozent. Im Mittel der größeren Gletscher (3–10 km²) war das Flächenverhältnis aus der Landsat-Aufnahme 1 Prozent höher mit einer maximalen Abweichung von 4 Prozent der Gletscherfläche.

HINTEREISFERNER SEPTEMBER 1973

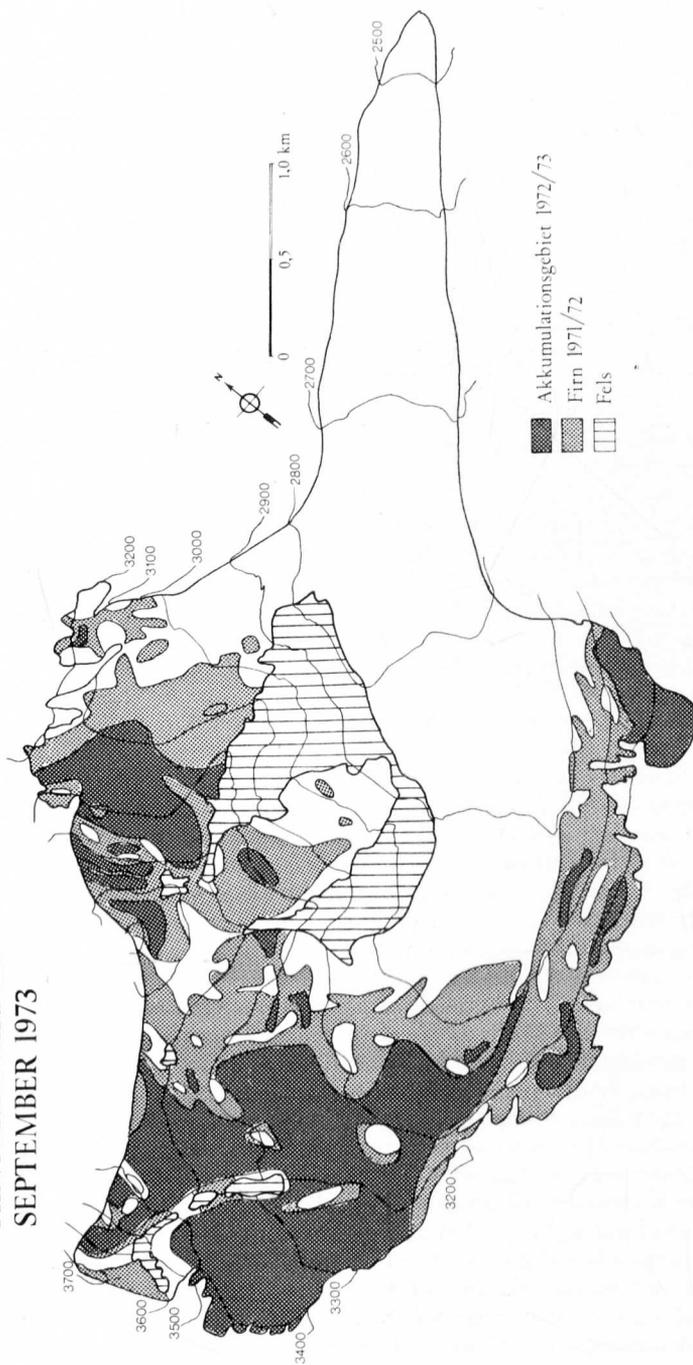


Abb. 6: Akkumulationsfläche des Haushaltsjahres 1972/1973 und Firnfläche des Haushaltsjahres 1971/1972 am Hintereisferner (Ötztaler Alpen), bestimmt aus Photographien von Flugzeug und Boden am 14. September 1973 und über Massenhaushaltsuntersuchungen Ende September 1973.

HINTEREISFERNER 13. 9. 1973

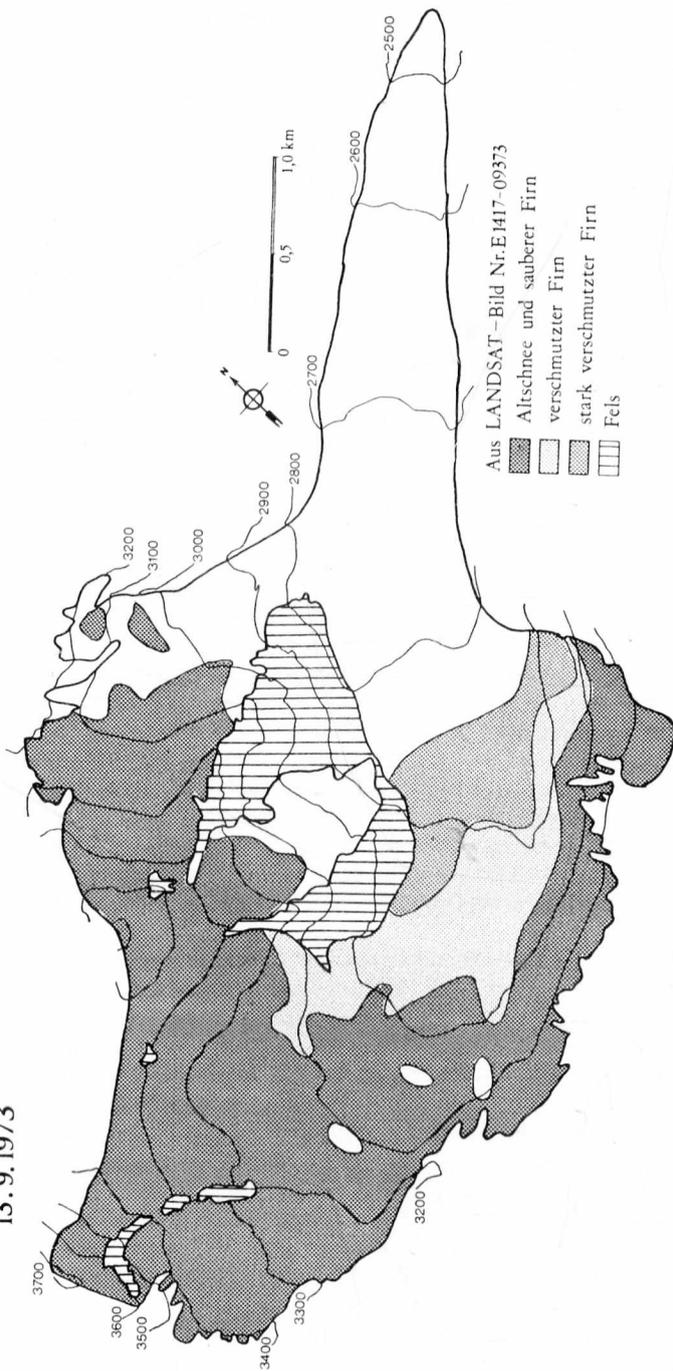


Abb. 7: Schneeflächen am Hintereisferner (Ötztaler Alpen) kartiert aus dem Landsat-Bild Nr. E-1417-09373 vom 13. September 1973.

Krimmel and Meier (1975) haben ebenfalls die Anwendbarkeit von Landsat-Bildern zur Kartierung auf Gletschern von wenigen Quadratkilometern Größe festgestellt. Auf Gletschern kann man eine größere Genauigkeit erzielen als in anderen Einzugsgebieten, in denen die Übergangszonen mit durchbrochener Schneedecke oder mit Schneeflecken im allgemeinen mehr Anteil einnehmen oder die Vegetation die Festlegung der Schneegrenze erschwert.

Aus den oben angeführten Vergleichen kann man folgende Schlüsse ziehen: Landsat-Bilder sind zur Kartierung von Schnee- und Eisflächen und von Schneegrenzen auf Gletschern ab einer Größe von 1 km² brauchbar, wobei auf kleinen Gletschern sowie in steilem Gelände und in Bruchzonen die Bestimmung der Flächenanteile weniger genau ist. Akkumulations- und Ablationsflächen, die für Rückschlüsse auf den Massenhaushalt wesentlich sind, können nicht direkt aus dem Satellitenbild ohne entsprechende Bodenkontrolle bestimmt werden. Die Interpretation der Satellitenbilder könnte z. B. bei teilweiser Neuschneebedeckung der Gletscher oder bei Verlauf der Gleichgewichtslinie innerhalb des Firngbietes zu falschen Rückschlüssen führen. Der große Vorteil des Landsat liegt darin, daß viele Gletscher gleichzeitig erfaßt werden.

ERGEBNISSE DER KARTIERUNG DER SCHNEEFÄCHEN IN DEN TIROLER ZENTRALALPEN

Auf Grund der erzielbaren Genauigkeit, die sich aus den im vorigen Kapitel besprochenen Vergleichen ergab, wurden die Satellitenbilder zur Kartierung der Ausaperung auf Gletschern ab einer Größe von 1 km² herangezogen. Auf den vorhandenen Satellitenbildern der Jahre 1972 und 1973 waren die Zillertaler Alpen westlich des Großen Löfflers sowie die Stubai- und die Ötztaler Alpen vollständig abgebildet. Um entsprechende Vergleiche zu ermöglichen, wurden auch die Gletscher südlich des Alpenhauptkammes in die Untersuchung einbezogen. Eine Einschränkung in der Vollständigkeit ergab sich lediglich dadurch, daß für einen Teil der Gletscher noch keine Karten mit aktuellen Gletscherständen vorhanden waren. Da es nicht sinnvoll schien, nach den alten Gletscherkarten Flächenverhältnisse und Schneegrenzen zu bestimmen, wurden diese Gletscher nicht zur Untersuchung herangezogen. Sobald aktuelle Karten vorhanden sind, soll die Kartierung für diese Gletscher nachgeholt werden.

Die 53 Gletscher, auf denen Schneeflächen und Schneegrenzen aus dem Satellitenbild bestimmt wurden, sind in Tabelle 1 angeführt. Grundlage für die Kartierung auf österreichischem Gebiet waren zum Großteil nicht-verifizierte Arbeitskarten des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen im Maßstab 1:25.000, die auf aerophotogrammetrischen Aufnahmen in den Jahren 1969 bis 1974 beruhen. Für die mit einem „*“ rechts der Nummer versehenen Gletscher wurden die Fläche, die mittlere Höhe, das Flächenverhältnis 1969 sowie die Gleichgewichtslinie und Firngrenze 1969 den Datenerhebungsblättern des österreichischen Gletscherinventars, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, entnommen, wobei als Grundlage die Luftaufnahme der österreichischen Gletscher im Spätsommer und Herbst 1969 diente. Die Auswertung der Gletscher in den nördlichen Stubai- und Ötztaler Alpen erfolgte nach der Österreichischen Karte 1:50.000, Blatt 147, mit Stand der Gletscher vom Sommer 1970. Die verwendeten Gletscherstände auf italienischem Gebiet stammen aus den Jahren zwischen 1960 und 1970 und wurden der amtlichen Italienischen Karte 1:25.000 entnommen. Da es sich bei den Gletschern südlich des Hauptkammes

nicht um Gletscher mit langen, flachen Zungen handelt, dürften sich von der Zeit der Aufnahme bis heute die Gletscherflächen nur wenig geändert haben.

In Tabelle 1 enthalten die Spalten rechts des Gletschernamens die Fläche in Quadratkilometern, weiters die mittlere Höhe gemittelt nach Flächenanteilen. Es folgt eine Angabe der Neigung des Gletschers, die den Einfluß der Exposition verstärkt. Es wurden drei Gruppen unterschieden: flach (fl) mit einer Neigung der wesentlichen Flächenanteile eines Gletschers unter 7° (120 m Höhe auf 1000 m Horizontalabstand), 7° bis 14° mittlere Neigung (m), und über 14° (250 m auf 1000 m) steil (st). Die nächste Spalte gibt die mittlere Exposition des Akkumulationsgebietes und des Ablationsgebietes an. Es folgen die Flächenverhältnisse der Akkumulationsfläche zur Gesamtfläche für 1969 (S_c/S 69) und für 1972 (S_c/S 72), sowie für September 1973 das Verhältnis der mit Altschnee aus dem Haushaltsjahr 1972/73 und mit Firn aus dem Haushaltsjahr 1971/72 bedeckten Fläche zur Gesamtfläche ($S_F/S73$). Für die Gletscher, deren Firnfläche 1973 auch aus Luftbildern bestimmt wurde, stellt $S_F/S73$ den Mittelwert des aus Luftbildern und Landsat-Bildern bestimmten Flächenverhältnisses dar. Die Spalte mit Höhenangaben der Schneegrenzen enthält für 1969 die Gleichgewichtslinie GL69 und die Firngrenze FG69 (Nulllinie der Eisablation), soweit diese Linien bestimmt werden konnten; für September 1972 die Gleichgewichtslinie GL72 und für September 1973 die Grenze Firn aus dem Haushaltsjahr 1971/72 gegen alten, stark verschmutzten Firn FL73. Da der stark verschmutzte Firn, der aus Jahren vor 1970 stammt, eine hohe Dichte hat und eine Albedo, die der von Eis ähnlich ist, kann man die FL73 in ihrer Bedeutung für den Wärmehaushalt der Gletscher und damit auch für den Massenhaushalt mit der Firngrenze 1973 gleichsetzen. In der letzten Spalte ist das Verhalten der Gletscherzunge in den letzten Jahren angegeben (R = Rückgang, S = stationär, V = Vorstoß). Die Daten sind den Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins und dem Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano (Anonym, 1973) entnommen. Zwei wichtige Anwendungsmöglichkeiten der Daten, die aus den Landsat-Bildern gewonnen wurden, werden im folgenden besprochen. Eine weitere Analyse der Daten könnte erfolgen, wenn die aktuellen Gletscherflächen auch für die Stubai- und Ötztaler Alpen vollständig bestimmt sind und somit auch für die einzelnen fehlenden Gletscher die Satellitenbilddatenauswertung für 1972 und 1973 nachgeholt werden kann.

LOKALE UND REGIONALE UNTERSCHIEDE IN DER HÖHENLAGE DER SCHNEEGRENZE

Die Höhenlage der Schneegrenze steht in Beziehung zur Niederschlagsverteilung. In Abbildung 8 wurde versucht, für die Tiroler Zentralalpen in groben Zügen eine mittlere Verteilung des Jahresniederschlags in einer Meereshöhe von 2000 m zu geben. Die strichlierten Linien stellen die Isohyeten des mittleren Jahresniederschlags in einer Meereshöhe von 2000 m dar und sind in Stufen von 50 cm Niederschlag pro Jahr eingezeichnet. Als Grundlage der Verteilung dienten die von Fliri (1975) gegebenen Niederschlagswerte der Stationen nördlich und südlich des Hauptkammes einschließlich der Totalisatorenwerte, die auf die Periode 1931–1960 bezogen sind. Es wurden nach Möglichkeit Stationen berücksichtigt, die nahe bei 2000 m Seehöhe liegen. Bei Abweichungen von dieser Höhe erfolgte eine Reduktion der Niederschlagswerte auf eine Höhe von 2000 m nach der Beziehung zwischen Jahresniederschlägen und Seehöhe, wie sie Lauscher (1961) für die Ötztaler und für

Tabelle 1: Gletscherdaten aus Luftbildern 1969 und Landsat-Bildern 1972 und 1973

| Nr. | Name | Fläche km ² | Mittl. Neig. Höhe | Expos. Abl. | Flächenverhältnis | | | Meereshöhe der Linie | | | Verhalten | |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|------|------|-----------|-----------|
| | | | | | S _c /S | S _c /S | S _F /S | GL | FG | FL | | GL |
| | | | | | 69 | 72 | 73 | 69 | 69 | 72 | 73 | |
| Zillertaler Alpen | | | | | | | | | | | | |
| 1* | Floitenkees | 4,8 | 2830 st | N | N | 0,75 | 0,59 | | 2650 | 2770 | 2770 | |
| 2* | Schwarzensteinkees | 4,6 | 2890 st | NW | NW | 0,62 | 0,58 | 2830 | 2700 | 2770 | 2850 | V seit 72 |
| 3* | Hornkees | 3,0 | 2790 st | N | N | 0,63 | 0,78 | 2710 | 2590 | 2620 | 2760 | V seit 69 |
| 4* | Waxeggkees | 3,9 | 2830 st | NE | N | 0,67 | 0,59 | 2730 | 2640 | 2660 | 2770 | V seit 65 |
| 5* | Schlegelskees | 6,4 | 2860 st | NW | NW | 0,66 | 0,55 | 2780 | 2680 | 2730 | 2840 | |
| 6* | Stampfkees | 1,7 | 3010 m | S | S | 0,84 | 0,43 | | | 2880 | 3020 | |
| 7* | Gefrorene Wand Kees | 4,4 | 2970 m | N | N | 0,77 | 0,56 | | | 2880 | 2940 | V beob. |
| 8 | Östl. Nöfesferner | 2,8 | 3020 st | S | S | 0,88 | 0,49 | | | 2750 | 3020 | R |
| 9 | Gliederferner | 2,6 | 2940 m | SW | W | 0,76 | 0,44 | | | 2770 | 2990 | R |
| 10 | Weißkarferner | 1,3 | 3150 st | SW | SW | 0,79 | 0,52 | | | 2900 | 3130 | |
| Stubai Alpen | | | | | | | | | | | | |
| 11* | Grünaufner | 1,9 | 2980 st | N | N | 0,73 | 0,78 | 2810 | 2640 | 2780 | 2930 | V seit 72 |
| 12* | Suzenaufner | 4,7 | 3060 m | N | N | 0,75 | 0,80 | 2830 | 2700 | 2770 | 2940 | V seit 70 |
| 13 | Fernaufner | 1,8 | 2900 m | NW | N | | 0,39 | | | 2800 | 2930 | S |
| 14 | Hochmoosferner | 1,5 | 3010 st | E | E | 0,78 | 0,48 | | | 2850 | 3020 | S |
| 15 | Alpeiner Ferner | 3,7 | 3040 m | NE | N | 0,76 | 0,48 | | | 2850 | 3040 | R |
| 16 | Sommerwandferner | 1,0 | 2870 st | N | NE | 0,70 | 0,40 | | | 2800 | 2910 | |
| 17 | Bergglasferner | 1,0 | 3100 st | E | NE | 0,77 | 0,58 | | | 2830 | 3030 | V seit 66 |
| 18 | Lisenser Ferner | 3,7 | 2990 m | NE | N | 0,79 | 0,37 | | | 2860 | 3040 | R |
| 19 | Schwarzenbergferner | 1,6 | 3080 m | SE | SW | 0,85 | 0,56 | | | 2940 | 3060 | V seit 74 |
| 20 | Triebenkarlesferner | 1,8 | 3030 m | W | SW | 0,82 | 0,49 | | | 2910 | 3030 | |
| 21 | Feuersteinferner | 1,6 | 2880 m | E | E | 0,77 | 0,47 | | | 2750 | 2890 | |
| 22 | Hängender Ferner | 1,5 | 2830 m | S | S | 0,89 | 0,13 | | | 2740 | 2920 | |
| 23 | Übeltalferner | 9,1 | 2940 m | E | E | 0,78 | 0,48 | | | 2790 | 2960 | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|------|------|----|----|----|------|------|------|------|------|-----------|
| 24* | Öztalener Alpen | 1,3 | 2850 | st | NW | NW | 0,70 | 0,46 | 2700 | 2720 | 3020 | V seit 72 |
| 25* | Gaßbergferner | 3,2 | 2960 | st | N | N | 0,65 | 0,53 | 2870 | 2810 | 2950 | R |
| 26* | Rotmoosferner | 3,5 | 2910 | m | N | N | 0,51 | 0,38 | 2910 | 2790 | 2990 | R |
| 27* | Langtaler Ferner | 11,1 | 2990 | fl | NW | N | 0,49 | 0,39 | 3000 | 2890 | 3040 | R |
| 28* | Gurgler Ferner | 1,7 | 3110 | st | NW | NW | 0,75 | 0,57 | 3000 | 2910 | 3070 | V beob. |
| 29* | Latschferner | 1,1 | 3080 | st | NW | NW | 0,69 | 0,54 | 3030 | 2930 | 3080 | R |
| 30 | Spiegelferner | 2,8 | 3130 | m | NW | NW | 0,89 | 0,58 | 2920 | 2920 | 3080 | R |
| 31* | Diemferner | 8,5 | 3130 | m | NW | NW | 0,72 | 0,58 | 3000 | 2920 | 3080 | R |
| 32* | Schalferner | 5,1 | 3160 | m | NW | N | 0,78 | 0,60 | 2930 | 2950 | 3100 | V seit 71 |
| 33* | Marzellferner | 2,9 | 3100 | m | NW | N | 0,56 | 0,40 | 3070 | 2960 | 3130 | R |
| 34* | Niederjochferner | 7,1 | 3030 | m | NW | N | 0,59 | 0,45 | 2970 | 2930 | 3070 | R |
| 35* | Hohejochferner | 9,0 | 3030 | fl | E | NE | 0,56 | 0,49 | 3000 | 2850 | 2900 | R |
| 36* | Hinterseiferner | 1,1 | 3140 | st | SE | SE | 0,55 | 0,72 | 3120 | 3020 | 3070 | R |
| 37* | Vernaglwandferner | 4,2 | 3180 | m | SE | SE | 0,79 | 0,86 | 3080 | 3040 | 3060 | R |
| 38* | Kesselwandferner | 1,0 | 3030 | st | E | NE | 0,58 | 0,42 | 3010 | 2910 | 2930 | V seit 70 |
| 39* | Mittlerer Guslarferner | 1,8 | 3120 | m | E | SE | 0,48 | 0,79 | 3130 | 2960 | 3120 | R |
| 40* | Großer Guslarferner | 9,6 | 3150 | m | S | S | 0,88 | 0,50 | 2980 | 2980 | 3150 | R |
| 41* | Vernagtferner | 1,1 | 3230 | s | SE | SE | 0,54 | 0,35 | 3220 | 3080 | 3270 | R |
| 42* | Mittenkarferner | 1,3 | 3290 | s | SE | SE | 0,71 | 0,71 | 3220 | 3050 | 3220 | V seit 70 |
| 43 | Rofenkarferner | 1,3 | 3080 | m | E | E | 0,71 | 0,55 | 3000 | 3000 | 3060 | R |
| 44 | Tiefenbachferner | 1,4 | 3020 | s | N | W | 0,73 | 0,57 | 2870 | 2970 | 2970 | V seit 72 |
| 45 | Karlesferner | 12,7 | 3060 | m | NE | N | 0,74 | 0,57 | 2930 | 2930 | 3020 | S |
| 46* | Mittelbergferner | 5,7 | 3200 | m | N | NW | 0,75 | 0,66 | 2970 | 2950 | 3050 | V seit 72 |
| 47* | Taschachferner, Hauptteil | 17,7 | 3090 | fl | N | N | 0,75 | 0,59 | 2960 | 2960 | 3040 | S |
| 48 | Gepatschferner | 1,9 | 3350 | m | S | S | 0,89 | 0,73 | 3160 | 3160 | 3280 | R |
| 49 | Graffner | 1,4 | 3060 | s | E | E | 0,76 | 0,30 | 2940 | 2940 | 3120 | R |
| 50 | Steinschlagferner | 3,4 | 3200 | s | SW | SW | 0,76 | 0,57 | 2970 | 2970 | 3160 | R |
| 51 | Matscher Ferner | 1,7 | 3020 | s | N | N | 0,80 | 0,63 | 2840 | 2840 | 2920 | V seit 63 |
| 52 | Bärenbartferner | 3,8 | 3030 | m | N | NW | 0,71 | 0,52 | 2900 | 2900 | 3020 | R |
| 53 | Langtaufener Ferner | 4,3 | 3200 | m | SW | W | 0,87 | 0,74 | 2980 | 2980 | 3110 | V beob. |
| 53 | Langtaufener Eiswände | | | | | | | | | | | |

Nr. mit Stern: Fläche, mittlere Höhe, Flächenverhältnis 1969, Meereshöhe der Gleichgewichtlinie 1969 und der Firngrenze 1969 sind entnommen aus den Datenerhebungsblättern des Österr. Gletscherinventars, Institut für Meteorologie und Geophysik, Univ. Innsbruck (unveröff.).

die Zillertaler Alpen angibt. Da der Flächenanteil der Höhenstufen über 2000 m in den zentralen Ötztaler Alpen größer ist als in den Stubai- und Zillertaler Alpen, kann man von den Niederschlagszahlen in Abbildung 8 nicht direkt auf den Gebietsniederschlag schließen, wie überhaupt die Reduktion des Niederschlages auf eine bestimmte Meereshöhe problematisch ist. Zweck dieser Darstellung der Niederschlagsverteilung soll es lediglich sein, die Abnahme des Niederschlages von den Zillertaler zu den Stubai- und den Ötztaler Alpen zu zeigen, ebenso die Abnahme innerhalb der Zillertaler und Stubai- und Ötztaler Alpen vom Hauptkamm weg nach Norden und Süden. Für die einzelnen Jahre 1972 und 1973 standen zu wenig Meßdaten zur Verfügung, um für höhere Lagen eine Niederschlagsverteilung geben zu können. Nach den Meßwerten der Klimastationen fiel im hydrologischen Jahr 1971/72 im gesamten Bereich der Tiroler Zentralalpen etwas weniger Niederschlag als normal; ähnlich waren die Niederschlagsverhältnisse im hydrologischen Jahr 1972/73, in dem bis auf die Zillertaler Alpen die Niederschlagswerte unter dem Durchschnitt lagen. Detaillierte Angaben über die lokale und regionale Verteilung von Schneeniederschlag kann man von einer Kartierung der Schneegrenzen während mehrerer Jahre erwarten, wobei auch der zeitliche Verlauf der Ausaperung im Frühjahr und Frühsummer wichtige Informationen liefert. Für diese Untersuchungen bieten sich Landsat-Bilder als geeignete Informationsquelle an.



Abb. 8: Skizze der Tiroler Zentralalpen mit mittlerer Meereshöhe der Gleichgewichtslinie 1972 auf den Gletschern und Isohyeten des mittleren Jahresniederschlages (— 150 —; Isohyeten mit Niederschlagswerten in cm/Jahr. 2840 m: mittlere Meereshöhe der Gleichgewichtslinien 1972 auf nordexponierten Gletschern des jeweiligen Gebietes. S 2940 m: mittlere Meereshöhe der Gleichgewichtslinien 1972 auf südexponierten Gletschern.)

Die Höhe der Gleichgewichtslinie 1972 (GL72) in Abbildung 8 steht in guter Beziehung zur Niederschlagsverteilung. Für die Untersuchung wurden die Gletscher aus Tabelle 1 in zwei Gruppen unterteilt: nordexponiert (NO bis NW) und südexponiert (SO bis SW). Die Neigung konnte nicht berücksichtigt werden, da nicht genügend Gletscher bei gleicher Exposition auch gleiche Neigung haben. 29 nordseitige Gletscher wurden zur Berechnung der 8 Höhenwerte der Gleichgewichtslinien der nordexponierten Gletscher verwendet, 12 südseitige für die 4 Werte der südexponierten Gletscher. Am tiefsten lag im September 1972 die Gleichgewichtslinie auf den Gletschern des Zillertaler Hauptkammes (2690 m nordseitig), gefolgt vom Stubai Hauptkamm. Nördlich davon steigt in beiden Gebirgsgruppen die Gleichgewichtslinie an, was der Abnahme der Niederschläge entspricht. Der Wert von 2800 m im Tuxertal ist nur durch einen großen Gletscher belegt (Gefrorene Wand Kees), die kleinen Gletscher (Olperer Ferner, Wildlahnerferner, Federbettkees) bestätigen jedoch den Anstieg der Gleichgewichtslinie vom Zillertaler Hauptkamm zum Tuxerkamm. Im Ötztaler Hauptkamm liegt die GL72 rund 200 m höher als in den zentralen Zillertaler Alpen. Auf den südseitigen Gletschern verläuft die GL72 in den Mittelwerten zwischen 80 m und 130 m höher als auf den nordexponierten Gletschern.

Für einzelne Gletscher ergeben sich größere Unterschiede als die oben angeführten Mittelwerte. Der tiefe Wert von 2690 m im Zillertaler Hauptkamm ist zum Teil durch die relativ starke Neigung der Gletscher bedingt. Die fünf Gletscher Flöitenkees, Schwarzensteinkees, Hornkees, Waxeggkees und Schlegeiskees sind in ihrer Form und Lage gleichartig und hatten 1972 und 1973 jeweils ähnliche Flächenverhältnisse. Trotzdem schwankte die Gleichgewichtslinie auf den einzelnen Gletschern 1972 zwischen 2620 und 2770 m. Ursache dafür sind Expositionsunterschiede, die bei der Steilheit der Gletscher wesentlich ins Gewicht fallen. Schwarzensteinkees und Schlegeiskees mit den höheren GL72 haben neben nordexponierten Gletscherflächen große Teile nach Westen exponiert. Die nordwestexponierten Gletscher des Ventertales (Latschferner, Spiegelferner, Diemferner, Schalfferner, Marzellferner, Niederjochferner, Hochjochferner) geben ein anderes Beispiel. Die GL72 dieser Gletscher lag zwischen 2920 m und 2950 m, während das Flächenverhältnis S_c/S_{72} zwischen 0,65 und 0,89 schwankte. Hier handelt es sich nach Größe und Höhenverteilung der Flächen um unterschiedliche Gletscher, die sich dementsprechend auch auf die langperiodischen Witterungsänderungen unterschiedlich rasch einstellen. Die relativ niedrige GL72 im Gurglerthal entspricht den etwas höheren Niederschlägen dieser Gegend gegenüber dem übrigen Ötztal; im Frühjahr und Sommer 1972 wurde in Obergurgl rund 20 Prozent mehr Niederschlag gemessen als in Vent. Für die tiefe Lage der Gleichgewichtslinie am Langtalerferner ist auch die starke Horizontabschirmung verantwortlich. Der Gaißbergferner mit seinem steilen Gletscherbruch über mehrere hundert Höhenmeter wurde für den Mittelwert des Gurglerales von 2810 m nicht berücksichtigt, da der Gletscher in seiner Topographie stark von den anderen Gletschern abweicht.

Für September 1973 erhält man im wesentlichen dieselben regionalen Unterschiede in der Höhe der Schneelinien (in diesem Fall FL73 aus Tabelle 1). Zwischen nord- und südseitigen Gletschern unterscheiden sich die Höhenlagen der Schneelinien in diesem Jahr mit wohl auf allen Gletschern negativer Massenbilanz stärker als im Jahre 1972 mit ausgeglichener oder positiver Massenbilanz. Ebenso schwanken innerhalb eines Gebietes die Meereshöhen der FL73 von Gletscher zu Gletscher in diesem Jahr stärker.

FLÄCHENVERHÄLTNISS UND MASSENHAUSHALT

Das Verhältnis von Akkumulationsgebiet zur Gesamtfläche eines Gletschers (S_c/S) bzw. das Verhältnis von Akkumulations- zu Ablationsgebiet am Ende eines Haushaltsjahres steht in enger Beziehung zur mittleren spezifischen Massenbilanz \bar{b} dieses Haushaltsjahres (Hoinkes, 1970). Abbildung 9 zeigt diese Beziehung zwischen \bar{b} (in g/cm^2) und dem Flächenverhältnis S_c/S für zwei Gletscher des Rofentales (Hintereisferner, $9 km^2$, und Kesselwandferner, $4 km^2$) und für das Stubacher Sonnblickkees (1,7 km^2) in den Hohen Tauern. Für den Hintereisferner sind die Haushaltswerte von 1952/53 bis 1974/75 (Hoinkes, 1970, Hoinkes et al., 1974) in der Abbildung eingezeichnet, für den Kesselwandferner die Werte 1963/64 bis 1974/75 (Hoinkes et al., 1974), für das Stubacher Sonnblickkees die Werte der Jahre 1963/64 bis 1971/72 (Slupetzky, 1974). Für den einzelnen Gletscher ist die Streuung der einzelnen Jahre um den mittleren Verlauf der Beziehung relativ gering. Wenn man die Beziehung für einen bestimmten Gletscher kennt, kann man für diesen Gletscher aus dem Flächenverhältnis ohne größeren Fehler den Bilanzwert eines Jahres bestimmen. Von einem Gletscher zum anderen unterscheidet sich der Verlauf der Beziehung je nach orographischen oder mesoklimatischen Begebenheiten mehr oder weniger stark. Die in Abbildung 9 enthaltenen Gletscher stellen drei verschiedene Gletschertypen in zwei Gegenden mit unterschiedlichen Niederschlagsverhältnissen dar; die Beziehungen zwischen \bar{b} und S_c/S für die drei Gletscher umfassen deshalb einen weiten Bereich unter den möglichen Zusammenhängen.

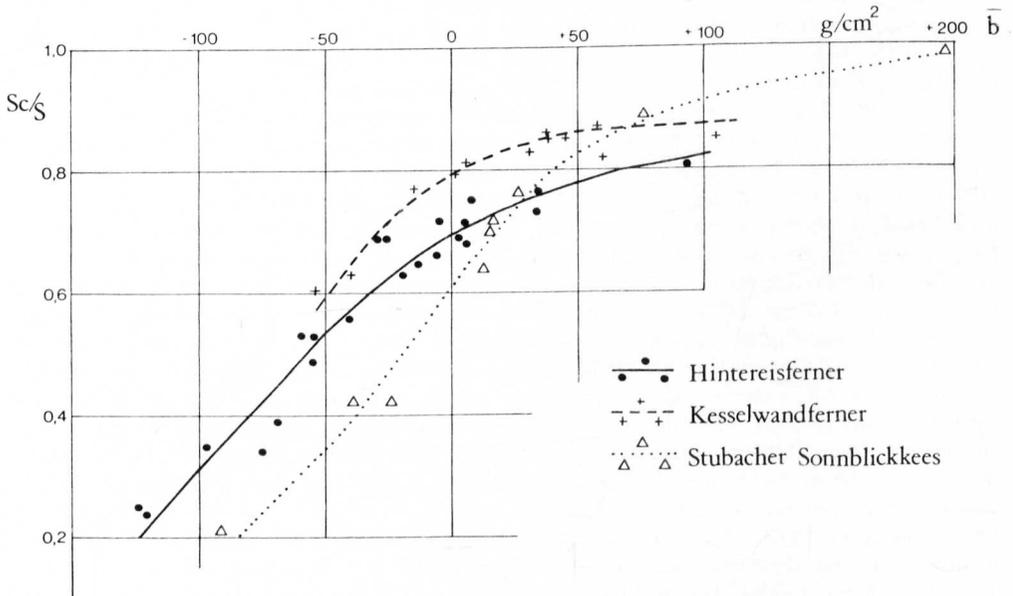


Abb. 9: Zusammenhang zwischen mittlerer spezifischer Massenbilanz \bar{b} in g/cm^2 und Flächenverhältnis von Akkumulationsgebiet zur Gesamtfläche des Gletschers (S_c/S) für Hintereisferner und Kesselwandferner in den Öztaler Alpen sowie Stubacher Sonnblickkees in den Hohen Tauern. Ein Zeichen gibt die beobachtete Beziehung für ein Haushaltsjahr wieder.

Der Kesselwandferner hat eine steile, südostseitige Zunge, die etwa 15% der Gletscherfläche einnimmt; der Rest der Fläche besteht zum Großteil aus dem flachen Gletscherbecken darüber. In Jahren mit eindeutig positiver Massenbilanz wird nur die steile Zunge schneefrei, die Gleichgewichtslinie verbleibt am unteren Rand des flachen Gletscherteiles. Deshalb ist die Unterscheidung stärker positiver Bilanzwerte über das Flächenverhältnis am Kesselwandferner nicht möglich (siehe Abb. 9). Auch der Stubacher Sonnblickkees, ein Hanggletscher ohne ausgeprägte Zunge, zeigt bei hohen Werten von S_c/S eine starke Zunahme der Bilanzwerte bei relativ geringer Änderung des Flächenverhältnisses. Beim Hintereisferner, einem Talgletscher mit relativ ungestörtem Längsprofil, ist ebenfalls eine Verflachung der Kurve in Abbildung 9 bei höheren Werten des Flächenverhältnisses angedeutet, wobei allerdings das Akkumulationsgebiet wegen der langen, tiefliegenden Zunge des Gletschers nicht so hohe Flächenanteile einnehmen kann wie auf den beiden anderen Gletschern. Das Flächenverhältnis S_c/S , bei dem die Massenbilanz ausgeglichen ist, reicht von etwa 0,62 beim Sonnblickkees bis 0,78 beim Kesselwandferner; der Hintereisferner nimmt mit etwa 0,70 eine Mittelstellung ein. Die Unterschiede im Verhalten der einzelnen Gletscher kann man aus der unterschiedlichen Höhenabhängigkeit der spezifischen Massenbilanz und mit der unterschiedlichen Flächenverteilung mit der Höhe interpretieren. Am Hintereisferner und Kesselwandferner sind die spezifischen Ablationswerte der Höhenstufe mit maximaler Ablation auch in Jahren mit stark negativer Massenbilanz mehr als doppelt so groß wie der Maximalwert am Sonnblickkees, während am Sonnblickkees höhere Werte der spezifischen Akkumulation erreicht werden, da die Gegend wesentlich mehr Niederschlag erhält als das innere Ötztal. Kesselwandferner und Hintereisferner wiederum liegen zwar im selben Tal, nur wenige Kilometer voneinander entfernt, unterscheiden sich aber in ihrer Form, Höhenlage und Exposition. Betrachtet man z. B. die Jahre mit ausgeglichener Massenbilanz, so ist die mittlere spezifische Ablation (die Ablation gemittelt über das gesamte Ablationsgebiet für ein Haushaltsjahr) am Kesselwandferner wegen seiner steilen, südostexponierten Zunge deutlich höher als die mittlere spezifische Ablation am Hintereisferner, während sich die mittlere spezifische Akkumulation in Jahren mit ausgeglichenem Massenhaushalt auf beiden Gletschern nicht wesentlich unterscheidet.

Aus den Flächenverhältnissen in Tabelle 1 kann man somit nur mit begrenzter Genauigkeit auf den Massenhaushalt der Gletscher ohne Massenhaushaltsreihen schließen. Im Ötztal dürfte ein Verhältnis S_c/S um 0,70 im Mittel eine ausgeglichene Massenbilanz bedeuten, wie es auch die Haushaltswerte des Vernagtferners (Reinwarth, 1972, 1976) andeuten. In niederschlagsreicheren Gebieten, wie den Hohen Tauern oder den Zillertaler Alpen, dürften niedrigere Werte von S_c/S als 0,70 (etwa 0,60 bis 0,65) einen ausgeglichenen Haushalt bedeuten.

Der Einfluß der Topographie auf die Beziehung Flächenverhältnis-Massenhaushalt ist allerdings keinesfalls zu vernachlässigen und könnte den Einfluß des Mesoklimas übertreffen, wie man aus dem Vergleich von Hintereisferner und Kesselwandferner schließen kann. Das deutet auch der niedere Wert des Flächenverhältnisses bei ausgeglichener Massenbilanz für den Langtaler Ferner in den Ötztaler Alpen an (Reinwarth, 1972), der eine nordseitige Exposition mit starker Horizontabschirmung hat.

Für verschiedene Überlegungen ist es von Interesse, welche Stellung die in dieser Arbeit untersuchten Haushaltsjahre in langjährigen Reihen der Massenbilanz ein-

nehmen. Für den Hintereisferner lauten die Werte der mittleren spezifischen Massenbilanz \bar{b} : 1968/69 $\bar{b} = -43 \text{ g/cm}^2$, 1971/72 $\bar{b} = -7 \text{ g/cm}^2$, 1972/73 $\bar{b} = -123 \text{ g/cm}^2$. Für den Kesselwandferner: 1968/69 $\bar{b} = -15 \text{ g/cm}^2$, 1971/72 $\bar{b} = +37 \text{ g/cm}^2$, 1972/73 $\bar{b} = -39 \text{ g/cm}^2$. In Abbildung 9 kann man für den Hintereisferner die Werte dieser Jahre innerhalb der eingezeichneten Haushaltswerte von 1952/53 bis 1974/75 vergleichen, für den Kesselwandferner innerhalb der eingezeichneten Haushaltswerte von 1963/64 bis 1974/75. Die relativen Änderungen der Massenbilanz von Jahr zu Jahr sind auf beiden Gletschern ähnlich. Zufolge der günstigen Flächen-Höhenverteilung am Kesselwandferner sind dessen Bilanzwerte allerdings weniger negativ bzw. stärker positiv. Die Massenbilanz 1972/73 war auf beiden Gletschern stark negativ und nimmt in beiden Reihen die zweite Stelle von unten ein. 1968/69 war die Bilanz am Hintereisferner deutlich negativ, am Kesselwandferner schwach negativ; 1971/72 war sie am Hintereisferner schwach negativ (nahezu ausgeglichen), am Kesselwandferner klar positiv.

Die Tabelle 1 ermöglicht Vergleiche der Verhältnisse von Akkumulationsfläche zur Gesamtfläche für die Haushaltsjahre 1968/69 (S_c/S_{69}) und 1971/72 (S_c/S_{72}).

Wie bereits im Zusammenhang mit den Bodenbeobachtungen gezeigt wurde, konnte im September 1973 nur die gemeinsame Akkumulationsfläche der Jahre 1971/72 und 1972/73 bzw. deren Verhältnis zur Gesamtfläche ($S_c/[72 + 73]/S$, in Tab. 1 S_F/S_{73} benannt) aus den Satellitenbildern bestimmt werden; der Rest der Gletscherflächen wurde von Eis oder von älterem, stark verschmutztem Firn von hoher Dichte eingenommen. Über die Kenntnis dieses Flächenverhältnisses S_F/S_{73} sind Rückschlüsse auf die Massenbilanz von 1972/73 nur indirekt über die Massenbilanz 1971/72 möglich, die man aus S_c/S_{72} näherungsweise bestimmen kann. Diese indirekte Bestimmung wäre mit relativ großer Unsicherheit behaftet, doch auch der Wert S_F/S_{73} als solcher ermöglicht sehr gut Vergleiche zwischen den einzelnen Gletschern. Weiters erhält man aus der Differenz von S_c/S_{72} und S_F/S_{73} die Abnahme der Fläche sauberen Firnschnees aus dem Haushaltsjahr 1971/72 während des Sommers 1973, was Rückschlüsse auf die Reaktion eines Gletschers auf Witterungsänderungen und auf den Abbau von Rücklagen zuläßt.

In Tabelle 2 sind die Flächenverhältnisse der Gletscher der Stubaier und Ötztaler Alpen für die Jahre 1968/69, 1971/72 und 1972/73 nach Gletschern im Vorstoß und Gletschern im Rückzug zusammengefaßt, wobei die Gletscher ihrer Größe nach in zwei Gruppen (kleiner und größer als 4 km^2) unterteilt sind. Die Zahl der Gletscher, die zum jeweiligen Mittelwert beitragen, ist ebenfalls verzeichnet; für 1968/69 ist die Zahl kleiner, weil auf einzelnen Gletschern das Flächenverhältnis wegen Neuschneebedeckung nicht bestimmbar war und weil die Luftbilder für einige Gletscher noch nicht ausgewertet sind. Die Flächenverhältnisse der Gletscher im Vorstoß und der Gletscher im Rückzug unterscheiden sich in den Jahren mit negativer Massenbilanz (1968/69 und 1972/73) deutlich voneinander. Die höchsten Flächenanteile erreichen die Akkumulationsgebiete in diesen Jahren auf den größeren vorstoßenden Gletschern (1968/69: $S_c/S = 0,76$, 1972/73: $S_F/S = 0,68$). Im Haushaltsjahr 1971/72 mit wohl auf den meisten Gletschern positiver oder ausgeglichener Massenbilanz sind die Unterschiede zwischen allen Gruppen der Tabelle 2 wesentlich geringer. Bei den kleinen Gletschern kann man zwischen vorstoßenden und zurückgehenden für 1971/72 keinen Unterschied feststellen, bei den großen Gletschern ist das Flächenverhältnis der vorstoßenden um einige Prozent höher. Für die Schwankung des Flächenverhältnisses von Jahr zu Jahr ist die Höherer Streckung eines Gletschers

wichtig, die Differenzen zwischen einzelnen Jahren sind bei Gletschern mit geringer Höhererstreckung größer. In den Zillertaler Alpen (Tabelle 1) unterscheiden sich im Jahr 1972/73 die Flächenverhältnisse je nach Vorstoß oder nach Rückzug ebenfalls deutlich voneinander. Die Flächenverhältnisse der nordexponierten Gletscher, die sich im Vorstoß befinden, sind in allen Jahren untereinander recht ähnlich und etwas niedriger als die Flächenverhältnisse der vorstoßenden Gletscher in den Stubai- und Ötztaler Alpen. Das bestärkt die früher getroffene Annahme, daß in den Zillertaler Alpen ein niedrigerer Wert von S_c/S eine ausgeglichene Massenbilanz bedeutet als in den niederschlagsärmeren Ötztaler Alpen.

Tabelle 2: Verhältnisse von Akkumulationsfläche zur Gesamtfläche der Gletscher (S_c/S) in den Ötztaler und Stubai-er Alpen, gemittelt für Gletscher im Vorstoß und im Rückzug mit einer Fläche kleiner bzw. größer als 4 km^2 (für 1972/73 Flächenverhältnis S_F/S).

| Jahr | im Vorstoß | | im Rückzug | |
|---------------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | Zahl der Gletscher | S_c/S | Zahl der Gletscher | S_c/S |
| Fläche $> 4 \text{ km}^2$ | | | | |
| 1968/69 | 3 | 0,76 | 4 | 0,59 |
| 1971/72 | 5 | 0,82 | 5 | 0,77 |
| 1972/73 | 5 | 0,68 | 5 | 0,48 |
| Fläche $< 4 \text{ km}^2$ | | | | |
| 1968/69 | 3 | 0,73 | 7 | 0,57 |
| 1971/72 | 8 | 0,80 | 10 | 0,80 |
| 1972/73 | 8 | 0,58 | 10 | 0,46 |

Der Vorstoß oder Rückzug einer Gletscherzunge ist die Reaktion auf Änderungen der klimatischen Verhältnisse, die eine Änderung der Gesamtmasse eines Gletschers verursachen. Die Massenänderung wirkt sich je nach Größe des Gletschers und nach orographischen Gegebenheiten mit einer mehr oder weniger großen Verzögerung in einer Änderung der Fließgeschwindigkeit der Gletscherzunge aus. Der jetzige Vorstoß von einem Teil der Gletscher ist die Reaktion auf eine Folge von mehreren Jahren mit gletschergünstiger Witterung; vor allem die Jahre 1965 bis 1968 brachten einen erheblichen Massenzuwachs der Gletscher (Hoinkes und Steinacker, 1975).

Je nach Flächen-Höhenverteilung eines Gletschers kann der gleiche Witterungsverlauf eines Jahres für den einen Gletscher eine positive Massenbilanz bedeuten, für den anderen hingegen nur eine ausgeglichene oder negative Massenbilanz. Die vorstoßenden Gletscher haben durchwegs günstigere Flächenverteilungen mit der Höhe sowie größere mittlere Höhen und haben deshalb, vor allem in Sommern mit gletschergünstiger Witterung, höhere Anteile der Akkumulationsflächen als die Gletscher im Rückzug. Die mittleren Höhen kann man Tabelle 1 entnehmen, wobei man allerdings Schlüsse von der mittleren Höhe auf das Verhalten eines Gletschers nur unter Berücksichtigung von Exposition, Neigung und Größe ziehen kann. Die Gletscher, die sich zur Zeit im Vorstoß befinden, haben sich schneller auf die geänderten klimatischen Verhältnisse nach der letzten Periode mit Gletschervorstoß (um 1920) eingestellt und reagieren deshalb auf den Massenzuwachs nach 1965 mit Längenzunahme. Bei den Gletschern im Rückzug entspricht deren Größe noch nicht völlig den Witterungsverhältnissen der letzten Jahre, wie das ungünstige

Flächenverhältnis in Tabelle 2 zeigt. Die kleinen Gletscher reagieren im allgemeinen schneller auf Witterungsänderungen; bei anhaltend gletscherungünstiger Witterung werden kleine Gletscher ihren Vorstoß eher beenden als große, wie man aus dem kleineren Wert von S_c/S_{73} bei den vorstoßenden Gletschern unter 4 km^2 im Vergleich mit den größeren Gletschern schließen kann. Bei den fünf vorstoßenden Gletschern über 4 km^2 handelt es sich durchwegs um einen ähnlichen Typ: Den Großteil der Fläche nimmt ein relativ hochliegendes, mehr oder weniger flaches Firngebiet ein, darunter folgt eine steile Stufe von mehreren hundert Höhenmetern. Negativ wird die Massenbilanz dieser Gletscher, wenn die Gleichgewichtslinie über die Steilstufe ins flache Firnbecken wandert. In den letzten Jahren gelangte die Gleichgewichtslinie meistens nicht über die Steilstufe hinauf. Zufolge der steilen Zungenteile stellen sich diese Gletscher außerdem rascher auf klimatische Veränderungen ein.

Mitunter sieht man auch bei einzelnen Teilen eines Gletschers unterschiedliches Verhalten. Z. B. am Hochjochferner im Ventertal, wo sich der Hauptteil im Rückzug befindet, während der Gletscherteil östlich der Fineil Spitze (Hauslabteil) vorstößt. Dementsprechend haben beide Teile unterschiedliche Flächenverhältnisse: 1971/72 Hauptteil $S_c/S = 0,53$, Hauslabteil $S_c/S = 0,84$; 1972/73 Hauptteil $S_F/S = 0,37$, Hauslabteil $S_F/S = 0,56$. Auch am Sulzenauferner in den Stubaier Alpen erhält man für den aktiven Hauptteil und für die Fernerstube unterschiedliche Werte des Flächenverhältnisses vor allem im Jahr 1972/73 mit negativer Massenbilanz: 1971/72 Hauptteil $S_c/S = 0,79$, Fernerstube $S_c/S = 0,81$; 1972/73 Hauptteil $S_F/S = 0,69$, Fernerstube $S_F/S = 0,56$.

Die in dieser Arbeit angeführten Beispiele weisen auf die Bedeutung der Landsat-Bilder für glaziologische Studien auch in Gebieten mit relativ kleinen Gletschern wie in den Alpen hin. Neben den eingehenden Massenhaushaltsstudien auf einzelnen Gletschern und neben Luftbildern bieten auch die Landsat-Bilder wertvolle Information, die zum Verständnis des Verhaltens der einzelnen Gletscher und deren Beziehung zur klimatischen Umwelt beitragen kann. Landsat-Bilder eignen sich besonders zur Anwendung der auf einzelnen Gletschern gewonnenen Erkenntnisse auf größere Gebiete und ermöglichen eine geschlossene Bearbeitung ganzer Gebirgsgruppen.

DANK

Die diesem Artikel zugrundeliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Beitrags Österreichs zum Internationalen Hydrologischen Programm durchgeführt; die Mittel wurden vom Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung über die Österreichische Akademie der Wissenschaften in Wien bereitgestellt. Den Herren Dipl.-Met. O. Reinwarth und Dipl.-Ing. H. Rentsch von der Kommission für Glaziologie der Bayrischen Akademie der Wissenschaften danke ich für die Überlassung von Bildmaterial. Besonderer Dank gebührt Dr. G. Patzelt und cand. phil. G. Groß, die mir bei der Beschaffung von Arbeitsunterlagen behilflich waren und die mir in zahlreichen Diskussionen wertvolle Anregungen vermitteln konnten. Herr Raoul Senoner führte mit großer Sorgfalt die photographische Ausarbeitung der Satellitenbilder durch.

LITERATUR

- Anonym, 1973: Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano, Serie Seconda, No 15—No 21 (1964—1973), Turin.
- Barnes, J. C., C. J. Bowley and D. A. Simmes, 1974: Snow Studies using Visible and Infrared Measurements from Earth Satellites. Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, Symposium at Monterey, California, Dec 2—6, 1973. Ed.: National Academy of Sciences, Washington D. C., p. 477—486.

- Dirmhirn, I., 1957: Zur spektralen Verteilung der Reflexion natürlicher Medien. *Wetter und Leben*, Jg. 9: 41–46.
- Dirmhirn, I., 1964: Das Strahlungsfeld im Lebensraum. Akadem. Verl. Ges., Frankfurt am Main.
- Fliri, F., 1975: Das Klima der Alpen im Raum von Tirol. Monographien zur Landeskunde Tirols. Universitätsverl. Wagner, Innsbruck.
- Haefner, H. and K. Seidel, 1974: Methodological Aspects and Regional Examples of Snow-Cover Mapping from ERTS-1 and EREP Imagery of the Swiss Alps. European Earth-Resources Satellite Experiments, Proceedings of a Symposium at Frascati, Italy, Jan 28 – Feb 1, 1974. Ed. ESRO, Neuilly, France, p. 155–164.
- Hoinkes, H., 1970: Methoden und Möglichkeiten von Massenhaushaltsstudien auf Gletschern. Ergebnisse der Meßreihe Hintereisferner (Ötztaler Alpen) 1953–1968. *Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 6: 37–90.
- Hoinkes, H., E. Dreiseitl and H. P. Wagner, 1974: Mass Balance of Hintereisferner and Kesselwandferner 1963/64 to 1972/73 in Relation to the Climatic Environment. IHD-Activities in Austria 1965–1974, Report to International Conference on the Results of IHD, 2–14 Sept. 1974 in Paris. Wien 1974.
- Hoinkes, H. und R. Steinacker, 1975: Zur Parametrisierung der Beziehung Klima—Gletscher. 13. Int. Tagung für Alpine Meteor., Saint-Vincent, 1974. *Rivista Italiana di Geofisica e Science Affini*, Vol. I: 97–104.
- Kinzl, H., 1975: Die Gletscher der Österreichischen Alpen 1974/75. *Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 11, 2: 257–264.
- Krimmel, R. M. and M. F. Meier, 1975: Glacier Applications of ERTS-Images. *J. of Glaciology*, Vol. 15: 391–402.
- Lauscher, F., 1961: Die Totalisatorennetze Österreichs. 54.–57. Jahresber. des Sonnblick-Vereines, Wien, S. 3–19.
- Meier, M. F., 1975: Application of Remote-Sensing Techniques to the Study of Seasonal Snow Cover. *J. of Glaciology*, Vol. 15: 251–265.
- Meier, M. F. and W. E. Evans, 1975: Comparison of Different Methods for Estimating Snow Cover in Forested, Mountainous Basins using Landsat Images. Workshop on Operational Applications of Satellite Snow Cover Observations, Lake Tahoe, Aug. 18–20, 1975. NASA SP-391, p. 215–234.
- O'Brien, H. W. and R. H. Munis, 1973: Red and Near-Infrared Spectral Reflectance of Snow. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (USACRREL) Research Report 332.
- Østrem, G., 1974a: ERTS-1 Images in Glaciology and Hydrology: Norwegian Experience. European Earth-Resources Satellite Experiments, Proceedings of a Symposium at Frascati, Italy, Jan 28 – Feb 1, 1974. Ed. ESRO, Neuilly, France, p. 165–172.
- Østrem, G., 1974b: The Use of ERTS Data to Monitor Glacier Behaviour and Snow Cover-Practical Implications for Water Power Production. *Hydrologisk Avdeling*, Nr. 24, Oslo, 12 S.
- Østrem, G., 1975: ERTS Data in Glaciology — an Effort to Monitor Glacier Mass Balance from Satellite Imagery. *J. of Glaciology*, Vol. 15: 403–415.
- Rango, A., D. F. McGinnis, V. V. Salamonson, and D. R. Wiesnet, 1974: New Dimensions in Satellite Hydrology. *Transactions, Amer. Geophysical Union*, Vol. 55: 703–711.
- Reinwarth, O., 1972: Untersuchungen zum Massenhaushalt des Vernagtferners (Ötztaler Alpen) 1965–1968. *Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 8: 43–63.
- Reinwarth, O., 1976: Hydrologische Untersuchungen am Vernagtferner, Ötztaler Alpen. Bericht des Sonderforschungsbereichs 81, Technische Universität München, S. 5–23.
- Slupetzky, H., 1974: Untersuchungen zur Massenbilanz eines Hanggletschers. Ergebnisse und Schlußfolgerungen aus der Meßreihe 1963/64–1970/71 vom Stubacher Sonnblickkees (Hohe Tauern). *Z. f. Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 10: 11–69.

Wiesnet, R., 1974: The Role of Satellites in Snow and Ice Measurements. Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources, Symposium at Monterey, California, Dec 2—6, 1973. Ed.: National Academy of Sciences, Washington D. C., p. 447—456.

Manuskript eingelangt am 3. November 1976.

Anschrift des Verfassers: Dr. Helmut Rott
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
Schöpfstraße 41
A-6020 Innsbruck