

to staff and students of Hillcrest Secondary School; and especially to Frank Charnley, Nairobi.

References

CAUKWELL, R. A., HASTENRATH, S.: A new map of Lewis Glacier, Mount Kenya. *Erdkunde*, 31, 1977, 85–87.

Forschungsunternehmen Nepal Himalaya: Mount Kenya 1:5,000. Kartographische Anstalt Freytag-Berndt und Artaria, Wien, 1967.

HASTENRATH, S.: Glacier recession in East Africa. pp. 135–142 in *Proceedings of WMO-IAMAP Symposium on long-term climatic variations, August 1975, Norwich, England, WMO-No. 421, Geneva, 1975*.

GRUNDSÄTZLICHES ZUM UNTERSCHIED ZWISCHEN TROPISCHEM UND AUSSERTROPISCHEM GLETSCHERHAUSHALT UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER GLETSCHER BOLIVIENS

Mit 6 Abbildungen, z. T. als Beilage X und 9 Photos

EKKEHARD JORDAN

Summary: Some basic considerations of the difference between tropical and extra-tropical glacier economy with special reference to the glaciers of Bolivia

Knowledge of mass economies of tropical glaciers is still very inadequate. Although tropical glaciers cover only 2000–3000 km², thus amounting to only about 1 per cent of the entire montane glaciation, 95 per cent of them are situated in the periodically-humid tropics, and take on the important function of water supply during the dry season. As a result of insufficient precipitation there is transition from the almost perennially-fed glaciers to the complete absence of glaciation in Bolivia, which, with a glacial area of almost 1000 km², belongs to this marginally tropical type.

The distribution of glaciers in Bolivia in their dependence on relief and climate is presented, and the totally different character of the tropical-marginally tropical glacier mass economy derived from the temporal regime of the climate as well as the observations and measurements carried out in 1975 and 1977. The difference from the glaciers of higher latitudes is chiefly to be seen in the absence of a strict annual periodicity, which renders the usage of the natural annual economy absolutely impossible. More exact quantitative proofs can only be achieved on the basis of a series of measurements extending over several years.

In den Gletschern der Erde ist ein Großteil unserer Süßwasservorräte gespeichert. Massenhaushaltsuntersuchungen an Gletschern sind der Schlüssel zur Ermittlung der Wasserreserven der Gletscher. Sie geben einen Einblick in die Beziehungen, die zwischen Gletschern und dem Klima bestehen. Aufgrund des mit derartigen Untersuchungen verbundenen hohen zeitlichen und apparativen Aufwandes ist es nur möglich, einzelne Probegletscher innerhalb ausgedehnter Gletschergebiete zu bearbeiten. Dies wird in den Gebieten traditioneller Gletscherforschung seit einigen Jahrzehnten betrieben, so daß wir für die Gletscher der Zone der gemäßigten Breiten der Nordhemisphäre bereits über recht gute Kenntnisse verfügen. Über die Gletscherhaushalte anderer Klimazonen sind wir weit weniger gut informiert; oft fehlt es dort selbst an der Kenntnis über die genaue Gletscherverbreitung.

Der Verfasser hat sich zur Aufgabe gestellt, Massenhaushaltsuntersuchungen in einer solchen – in diesem Falle tropischen – Gletscherregion durchzuführen und dazu die Gletscher Boliviens ausgewählt. Die Grundlagen der nachfolgenden Ausführungen wurden auf zwei Forschungsreisen nach Bolivien von Juli bis September 1975 und Februar bis Juni 1977¹⁾ mit Unterstützung durch den Servicio Geologico de Bolivia (GEOBOL) und das Instituto de Geologia Aplicada – UMSA La Paz/FU Berlin erarbeitet. Es soll hier zunächst ein Einblick in den Stand der Erforschung tropischer Gletscher sowie in die Situation derartiger Forschungen in Bolivien mit einem Überblick über die regionalen Verhältnisse gegeben werden und dann einiges zum Massenhaushalt tropisch-randtropischer Gletscher ausgeführt werden.

Der Stand der Erforschung tropischer Gletscher

Während in den Außertropen allein für die Alpen die Literatur zur Gletscherforschung fast unübersehbar ist, ist sie für tropische Gletscher zwar weit verstreut, aber durch ein gutes Dutzend von Aufsätzen bereits erschöpft. Dabei stehen in der älteren Literatur von HAUTHAL, HERZOG, MEYER, SIEVERS etc. zu Anfang des Jahrhunderts Entdeckung und Beschreibung sowie vereinzelt Schneegrenzangaben im Vordergrund. In den bedeutenden Arbeiten von KINZL und TROLL ab Ende der zwanziger Jahre werden dann auch neben der Erschließung von im wahrsten Sinne weißen Flecken, typologische und ursächliche Fragen angesprochen, und es folgen von HUMPHRIES (1959), WHITTOV et al (1963) und PLATT (1966) weitere Angaben zu den tropischen Gletschern Afrikas. Über rein klimato-

¹⁾ Für Finanzierung und Förderung sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, den Kreidlerwerken, Kornwestheim, Firma Wassermann, Gehrden, sowie zahlreichen unbenannten Personen und Institutionen in Deutschland und Bolivien herzlich gedankt.

logische Datenerfassung hinausgehende Messungen an tropischen Gletschern werden, abgesehen von der fragwürdigen Lysimetermessung HOWELL's (1953), aber erst seit Anfang der siebziger Jahre durchgeführt. Hierbei hat ALLISON (1974) auf Neu Guinea Formen, Fließgeschwindigkeiten und Massenhaushalte erfaßt, und MERCER & THOMPSON et al (1975) haben ein Temperaturprofil und Dichtebestimmungen sowie Isotopen- und Feinpartikelanalysen am Quelccaya Gletscher in Südperu vorgenommen. Von demselben Gletscher veröffentlichte jüngst auch HASTENRATH (1978) Auswertungen von Wärmehaushaltsmessungen.

Mit glazialhydrologischen Fragen zur Kontrolle der gefährlichen Gletscherseen beschäftigt sich MORALES (1966) in Peru, und hier liegt auch eine sehr gründliche Daten- und Literatúrauswertung von FLIRI (1968) zur Hydrologie und Glaziologie der Cordillera Blanca vor. Alle anderen Arbeiten sind morphologisch-geologischer Natur und behandeln das Gletschervorland. In Bolivien gibt es seit TROLLS Studien keine glaziologische Bearbeitung rezenter Gletscher mehr.

Bereits aus der Nennung der Namen geht hervor, daß die Impulse zur Gletscherforschung in den Tropen aus Europa oder Nordamerika kommen.

Nur in Peru scheinen sich, ausgelöst durch die Gletscherkatastrophe des Huascaran und immer wieder auftretende fatale Gletscherseeausbrüche kleineren Ausmaßes, die finanziellen Mittel aufbringen zu lassen und durch unermüdlchen Einsatz des Geologen BENJAMIN MORALES allmählich ein glaziologischer Dienst aufzubauen. In Bolivien besteht die Gefahr von Gletscherseeausbrüchen oder Eisabbrüchen mit nachfolgenden verheerenden Auswirkungen für Mensch und Wirtschaft kaum, so daß es bisher keinen akuten Anlaß gab, einen landeseigenen Gletscherdienst einzurichten und aufgrund der vielen bisher ungenutzten anderen Wasser- und Wasserkraftreserven des Landes vermeintlich noch nicht die zwingende Notwendigkeit besteht, derartige Beobachtungen und Untersuchungen anzustellen.

Da das volle Ausmaß des wirtschaftlichen Wertes von glaziologischen und glazialhydrologischen Untersuchungen stets erst nach langfristigen Messungen überschaubar ist, bleibt wohl auch weiterhin für die Ermittlung des Nutzpentials der bolivianischen Gletscher nur die durch das Ausland geförderte Forschung.

Weshalb die Erforschung tropischer Gletscher bisher nur so unzureichend erfolgt ist, liegt sicher nicht nur daran, daß die tropischen Gletscher mit rund 2000–3000 km² nur knapp 1% der Gebirgsvergletscherung ausmachen, die wiederum nur weniger als 1% der insgesamt vergletscherten Fläche der Erde beträgt, sondern hat vielfältige Gründe: Es ist zum einen die enorme Höhenlage tropischer Gletscher, die nicht unter 4000 m, teilweise nicht einmal unter 5000 m hinunterreichen, damit verbunden die Unzugänglichkeit und in der Regel völlig fehlende Hüttenerschließung der

höchsten Gebirgslagen, zum anderen aber auch die Zurückhaltung der einheimischen Bevölkerung, weil sie teilweise die Gletscher als heilig ansieht. Für Ausländer hingegen sind die weiten Entfernungen zum Forschungsobjekt ein großes Hindernis, zumal wenn es sich um die Durchführung kontinuierlicher Messungen handelt.

Der eingangs angegebene Flächenvergleich könnte falsche Wertvorstellungen erwecken; denn gerade die tropischen Gletscher sind ein lebenswichtiges hydrologisches Glied in den sie umrahmenden Landschaftsräumen, wie wir es in diesem Maße nur noch bei den Gletschern der Subtropen wiederfinden. Dies wiederum ist auf ihre rein orographisch-klimatisch bedingte Verteilung zurückzuführen; denn ca. 95% der tropischen Gletscherareale liegen in den wechselfeuchten Tropen allein Perus und Boliviens und kommen damit während der Trockenzeit als wichtigste, teilweise sogar einzige Wasser- und damit Lebensspender in Betracht.

Die Situation der Gletscher in Bolivien

Wenn auch der Wissenschaftler seine Untersuchungsobjekte sicherlich nicht nur nach Zweckdienlichkeitsüberlegungen auswählen sollte, so ist andererseits die Einbeziehung solcher Gesichtspunkte auch nicht unbedingt von Nachteil, ja, in Entwicklungsländern in der Regel wünschenswert. Es ist daher primäres Forschungsanliegen und noch in Ferne stehendes Hauptziel der begonnenen Gletscheruntersuchungen in Bolivien, den hygriisch bedingten Wandel des Verhältnisses der Größen Abfluß zu Verdunstung an tropischen Gletschern in seiner regionalen Differenzierung zu erfassen. Dazu ist die Kombination von hydrologischen und glaziologischen Massenhaushaltsuntersuchungen der Gletscher notwendig und unter Berücksichtigung des Anwendungsaspektes die Erfassung der Gletscherdimensionen erforderlich. Aus arbeitsökonomischen Gründen ist hierzu die Beschränkung auf ein politisches Staatsgebilde zweckmäßig. Wobei es kein geeigneteres Land als Bolivien gibt; denn nur seine Eismassen reichen von den fast humiden Feuchttropengletschern im äußersten Nordosten Boliviens an der Ostabdachung der Kordillere bis zu den wegen übergroßer Trockenheit selbst oberhalb 6000 m nicht mehr vergletscherten Gipfeln im Südwesten. Wenn dabei auch aus den Publikationen von AHLFELD, HERZOG, TROLL u. a. das ausreichende Vorhandensein von Gletschern für derartige Untersuchungsanliegen in diesem Lande bekannt war, so konnten doch erst durch eigene Anschauung und überschlägige Ausmessung von Luftbildern die Aussagen über die angeblich geringfügigen Vergletscherungsausmaße Boliviens von LLIBOUTRY (1965/66) und ebenso noch WILHELM (1975) dahingehend präzisiert werden, daß es sich immerhin um eine Fläche von knapp 1000 qkm handelt, und damit die Kordilleren Boliviens eine umfangreichere rezente Vergletscherung aufweisen als die Österreichischen Alpen.

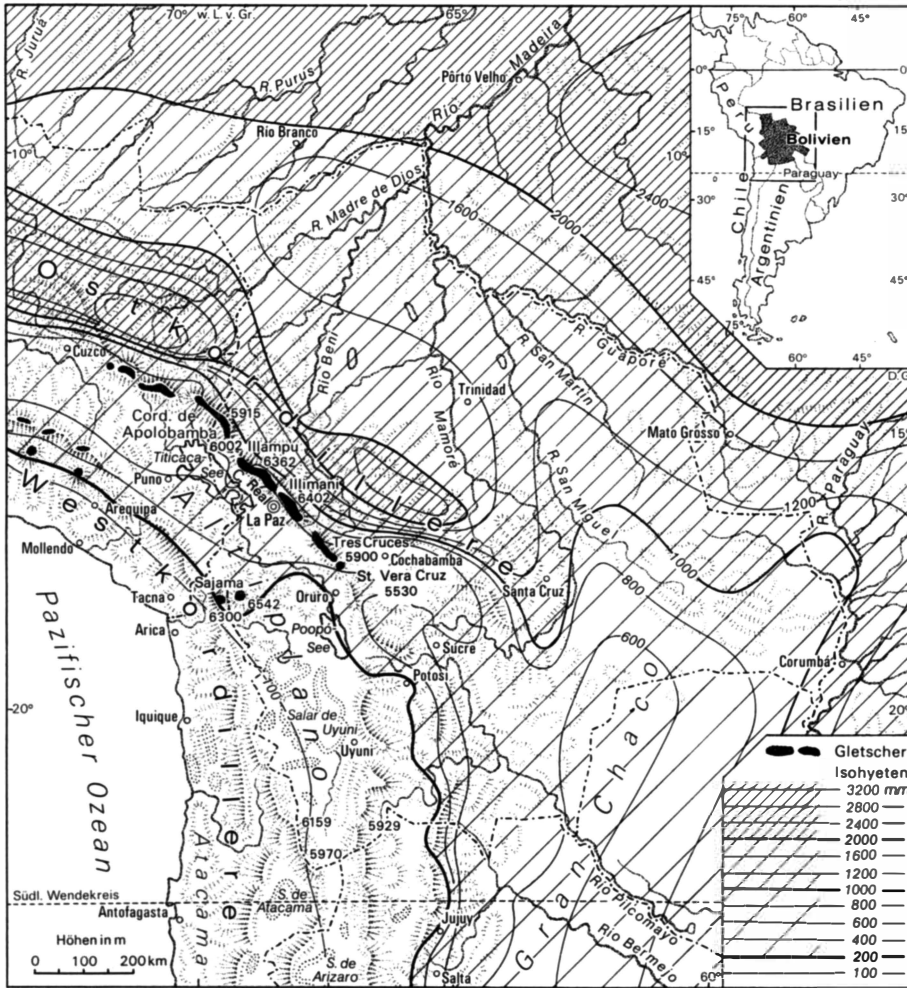


Abb. 1: Die Gletschergebiete Boliviens
The glacier regions of Bolivia

Die gewaltige Ausdehnung der bolivianischen Anden nimmt zwar nur ein Drittel der Landesfläche Boliviens ein, weist aber mit seinen ca. 400 000 km² fast die zweifache Größe der Bundesrepublik Deutschland auf, doch, wie bereits angedeutet, ist die Gletscherverbreitung auch nicht annähernd gleichmäßig über den Gebirgsbereich Boliviens verteilt. Diese Gebirgsregion läßt eine klare orographisch-morphologische Gliederung in West-Ost-Richtung erkennen, die bedingt ist durch die große Ost-West-Erstreckung des Gebirges im Bereich des Andenkniees. Der weitgehend aus Vulkanen aufgebauten Nord-Süd verlaufenden Westkordillere mit um und über 6000 m Gipfelhöhen steht in einem Abstand von ca. 200 km die Ostkordillere gegenüber, die in ihrem nördlichen Teil Nordwest-Südost verläuft und im Süden ebenfalls eine Nord-Süd-Ausrichtung aufweist. Sie erreicht besonders im Norden in mehreren Massiven über 6000 m, aber auch im Süden in den an die vulkanische Westkordillere Anschluß fin-

denden Erhebungen ebenfalls ca. 6000 m. Dazwischen liegt als intramontanes riesiges abflußloses Sedimentationsbecken der Altiplano mit immerhin auch fast 4000 m Basishöhe.

Die rezente Vergletscherung beschränkt sich auf den nördlichen Teil der Ostkordillere bis zum Andenknie auf etwa 18° südl. Breite und auf einzelne Vulkan-gipfel in der nördlichen Westkordillere (Abb. 1).

Dabei liegen fast 99% der Gletscherfläche in der Ostkordillere, in der die über 5500 m hinausragenden Massive eine geschlossene Gebirgsvergletscherung aufweisen. Dies sind von Nord bis Süd:

- 1) die Cordillera de Apolobamba, die bis nach Peru hineinreicht und 6000 m nur im Chaupi Orco, dem Grenz-gipfel zu Peru, knapp überschreitet mit einer Längserstreckung von etwa 70 km (Abb. 3, Photo 1),
- 2) die Cordillera Real vom Illampu mit knapp 6500 m bis zum Illimani mit etwa gleicher Höhe, durch-

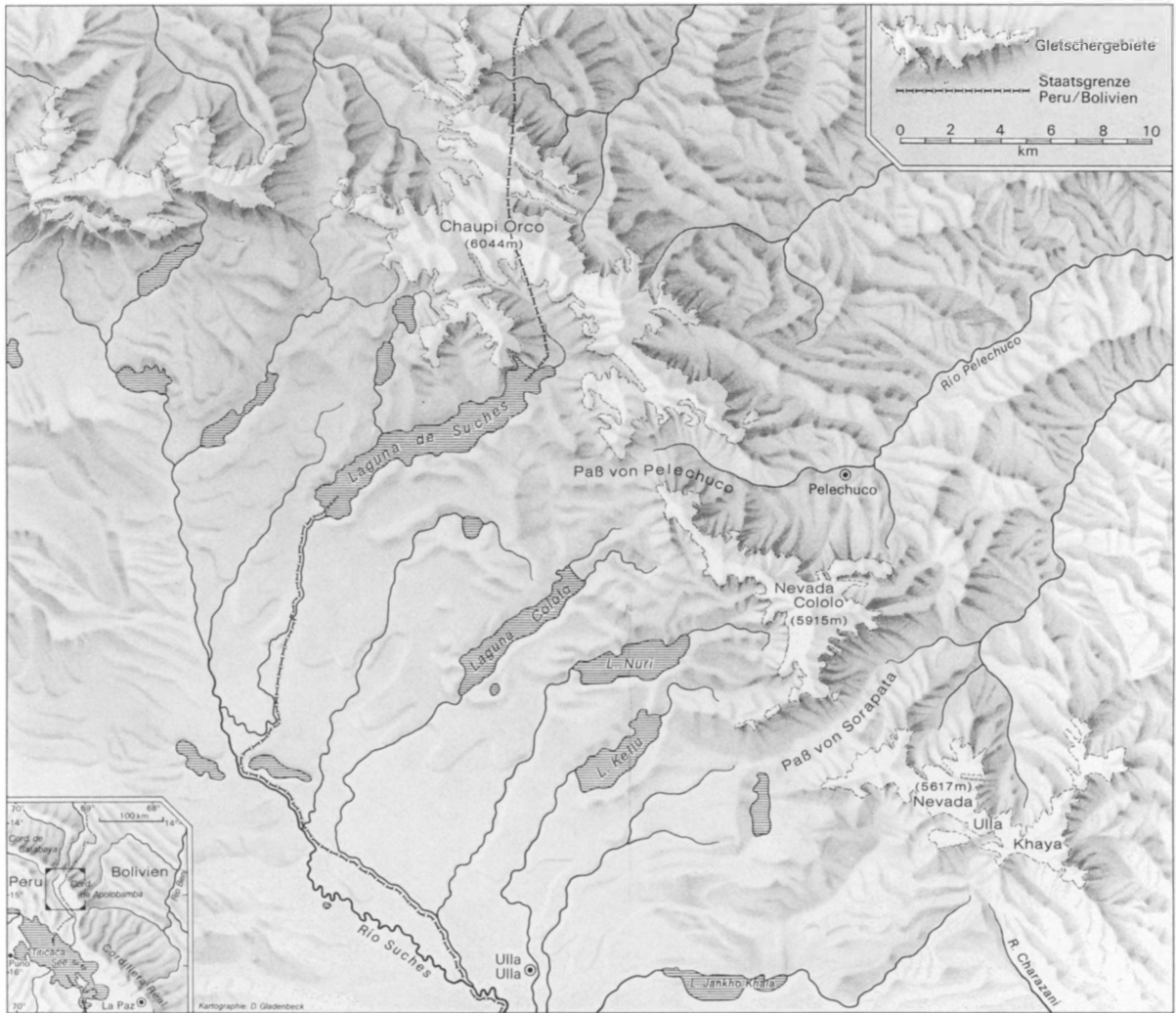


Abb. 3: Gletschergebiete der Cordillera Apolobamba
Glacier areas of the Cordillera Apolobamba

brochen von einigen unvergletscherten Pässen östlich von La Paz. Die Längerstreckung dieses Vergletscherungsbereiches erreicht immerhin über 150 km (Abb. 2, Beilage X), (Photo 2),

- 3) die Tres Cruces (Spanisch) oder auch Quimsa Cruz (Quetchua/Aimara) genannt, die Gipfelhöhen von ca. 5900 m und eine Längerstreckung von etwa 40 km aufweisen (Photo 3–6),
- 4) die Santa Vera Cruz, ein einzelner Gebirgsstock mit 5500 m Höhe als südlichster vergletschelter Bereich der Ostkordillere (Photo 7).

Dem stehen in der Westkordillere eigentlich nur gegenüber die vergletscherten Vulkankegel des Sajama, als höchster Berg Boliviens, mit 6542 m (Photo 8), und die Payachatas der Parinacotagruppe mit ca. 6300 m (Photo 9), die bereits nach Chile hinüberreichen.

Alle südlich anschließenden Gebirgsbereiche beider Kordillerezüge Boliviens sind trotz respektable Höhen gletscherfrei und weisen nur eine periodisch bis episodische Schnee- und Firndecke auf. Damit dürfte deutlich hervorgehoben sein, daß die Gletschervorkommen in Bolivien weniger relief- als vielmehr, wie im weiteren zu begründen, in erster Linie klimabedingt sind.

Sehr bemerkenswert ist die expositionsbezogene Verteilung der Gletscherflächen. Während in der Cord. Apolobamba das Verhältnis von Gletscherflächen der Ostabdachung zu denjenigen der Westabdachung nur geringfügig zugunsten westseitiger Gletscher neigt, verlagert sich diese Relation bis in die südlichsten Breiten der Santa Vera Cruz zunehmend eindeutiger auf die Westseite, einhergehend mit einem Anstieg der Gletscheruntergrenze von ca. 4600 m auf ca. 5100 m



1

Photo 1: Die Vergletscherung der Ostabdachung der Cordillera Apolobamba im Bereich des oberen Pelechucotales (Photo: JORDAN 3. 5. 1977)

The glaciation of the eastern slope of the Cordillera Apolobamba in the area of the upper Pelehuco Valley



2

Photo 2: Das Illimani-Massiv als südlichster Teil der Cordillera Real und Wahrzeichen der Hauptstadt La Paz mit seinen Gletscherabbrüchen am Westabfall zum Rio La Paz (Photo: JORDAN 11. 4. 1977)

The Illimani Massif as southernmost part of the Cordillera Real and symbol of the capital La Paz with its glaciers ruptures on the western slope towards the Rio La Paz

(vgl. Photo 1–7). Diese Tatsache trifft auch für die Westkordillere zu, wobei extreme Ost- bis Südexpositionen in allen Breitenlagen bezüglich der Vergletscherung erheblich benachteiligt sind (vgl. Photo 9). Auch für diesen Befund können nur sehr beschränkt die Reliefverhältnisse verantwortlich gemacht werden, wengleich zumindest bei der Ostkordillere darauf hingewiesen werden muß, daß wegen der überwiegend wesentlich höher, nämlich im Altiplanoniveau bei 3800–4000 m gelegenen Erosionsbasis die Steilheit des Reliefs der Westabdachung nicht die Prägnanz erreicht, wie sie uns auf der Ostseite begegnet. Damit muß erneut das Klima zur Begründung herangezogen werden, und es soll nunmehr seine allgemeine Ausprägung und Effektivität für die Gletscher auf genetischer Grundlage näher erläutert werden.

Die klimatischen Grundlagen der Gletscherverbreitung

Bolivians Gletscher liegen mit ihrer Erstreckung zwischen $14^{\circ} 40'$ und $18^{\circ} 30'$ südlicher Breite am Südrand der südhemisphärischen Tropen und damit im Wechselbereich zwischen passatischen Strömungen im Südwinter und solchen des inneräquatorialen Zirkulationssystems im Südsommer. Dementsprechend gibt es im gesamten Gebirgsbereich Boliviens den ausgeprägten Gegensatz zwischen sommerlicher Regenzeit und winterlicher Trockenheit. Da jedoch die feuchten, niederschlagspendenden Luftmassen von Norden bis Nordosten, aus dem Amazonasbereich kommend, dem im Sommer mehr oder minder stark über dem Paranaetiefland ausgebildeten Tief zuströmen, treffen sie bei der gegebenen Reliefkonstellation im Bereich des Andenkniees voll auf den Ostabfall der nördlichen Ost-

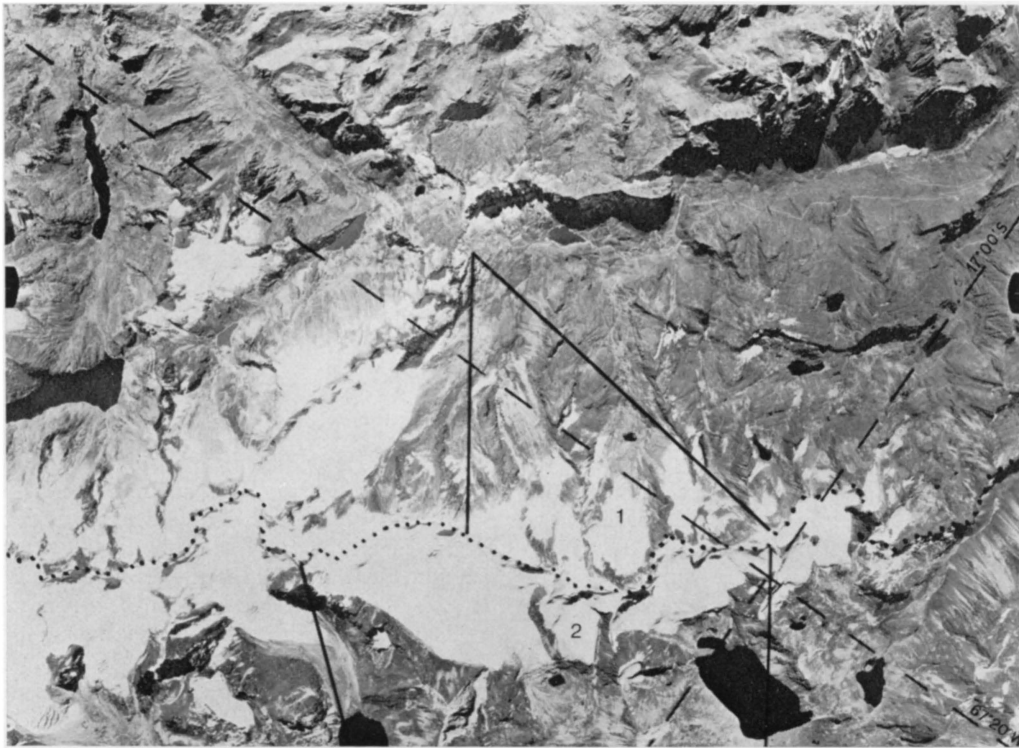
kordillere, verlieren durch die Aufwärtsbewegung erheblich an Luftfeuchtigkeit und bringen den im Lee gelegenen Gebirgsteilen nur noch wesentlich geringere Niederschläge.

Die Erscheinungen der höhenbedingten Niederschlagszunahme, wie sie von FLIRI (1968) für Westperu festgestellt wurden, oder einer möglichen Stufe maximaler Niederschläge, die WEISCHET (1969) in Gebirgsbereichen Kolumbiens nachweisen konnte, bzw. das Auftreten eines doppelten Maximums, wie es LAUER (1976 und 1978) für die mexikanische Meseta und deren Ostabfall nachwies und für andere Tropengebirge als sehr wahrscheinlich ableitete, sowie der Einfluß des Massenerhebungseffektes für die Gletscherbildung, der von GRAF (1975) für die letztglaziale Vereisung des Altiplano angesprochen wird, haben möglicherweise auch für die aktuelle Vergletscherung in Bolivien Bedeutung, können aber wegen fehlender Daten nicht zwingend nachgewiesen werden. Besonders die häufig zu beobachtende Erscheinung zweier deutlich voneinander getrennter Wolkenschichten, einer unteren mit Obergrenze in ca. 3000–3200 m Höhe und einer oberen von etwa 5000 m aufwärts, lassen die Ausführungen LAUER's (1976) auch für die Kordilleren Boliviens als zutreffend annehmen.

Eine zweite Ursache für die Niederschlagsverteilung liegt in der von Süd nach Nord fortschreitenden Ablösung des für den Sommer geschilderten Strömungsverlaufs durch den trockenheitbringenden Südost-Passat des Winters, was eine von Nord nach Süd abnehmende Verweildauer der feuchttropischen Zirkulation und niederschlagspendenden Luftmassen zur Folge hat. Andererseits erhält der bolivianische Kordillerenbereich infolge des außerordentlich stabilen südpazifischen Subtropenhochs durch den Nord-Süd-Verlauf der



3



4



5

Photo 3: Das Ausmaß der Vergletscherung an der SO-Abdachung der südlichen Quimsa Cruz im Caracoles Tal (Photo: JORDAN 8. 4. 1977)

The extensive glaciation at the south-eastern slope of the southern Quimsa Cruz in the Caracoles Valley (photo: JORDAN 8. 4. 1977)

Photo 4: Der Südteil der Quimsa Cruz im Luftbild mit dem ungefähren Verlauf eines Längen- und Breitenkreises (gestrichelte Linien) und dem Verlauf der Wasserscheide (gepunktete Linie). Die mit 1 und 2 bezeichneten Ausschnitte begrenzen den Bereich der beiden nebenstehenden terrestrischen Aufnahmen (1 = Photo 3, 2 = Photo 5). Auf diesen beiden Abbildungen wird der unterschiedliche Grad der Vergletscherung auf der SO-Abdachung (Photo 3) gegenüber der NW-Abdachung (Photo 5) des Gebirgszuges, wie er bereits aus dem Luftbild erkenntlich wird, besonders deutlich (Quelle: Luftbild des IGM – La Paz, Aufnahme datum 29. 7. 1975, Maßstab ca. 1: 60 000)

The southern slope of the Quimsa Cruz as seen from the air, with the approximate course of a longitudinal and latitudinal line (pecked lines) and the course of the watershed (dotted line). The sections marked 1 and 2 limit the areas of the two adjacent terrestrial plates (1 = Photo 3, 2 = Photo 5). Both these illustrations emphasize particularly well the different degree of glaciation on the south-eastern slope (Photo 3) compared with that of the north-western slope (Photo 5) of the mountain range, which could already be distinguished in the air-photo (source: Aerial photograph of the IGM – La Paz, exposure dated 29. 7. 1975, scale c. 1:60,000).

Photo 5: Das Ausmaß der Vergletscherung an der NW-Abdachung der südlichen Quimsa Cruz im Bereich zwischen Laramcota (rechts) und Huallatam (links) aus terrestrischer Sicht (Photo: JORDAN 12. 5. 1977, Tele)

The extent of glaciation on the north-western slope of the southern Quimsa Cruz in the area between Laramcota (right) and Huallatam (left) from a terrestrial viewpoint (photo: JORDAN, 12. 5. 1977, telephoto).



Photo 6: Die Vergletscherung der NW-Abdachung der südlichen Quimsa Cruz als Luftbild-Schrägaufnahme den Gesamtbereich des Senkrechtluftbildes umfassend vom Nev. Atoroma (links) bis zum Cerro Aguilar (rechts). (Photo: JORDAN 18. 5. 1977)

The glaciation of the north-west slope of the southern Quimsa Cruz as oblique air-photo, including the entire area of the vertical air-photo from Nev. Atoroma (left) to Cerro Aguilar (right). (Photo: JORDAN 18. 5. 1977)

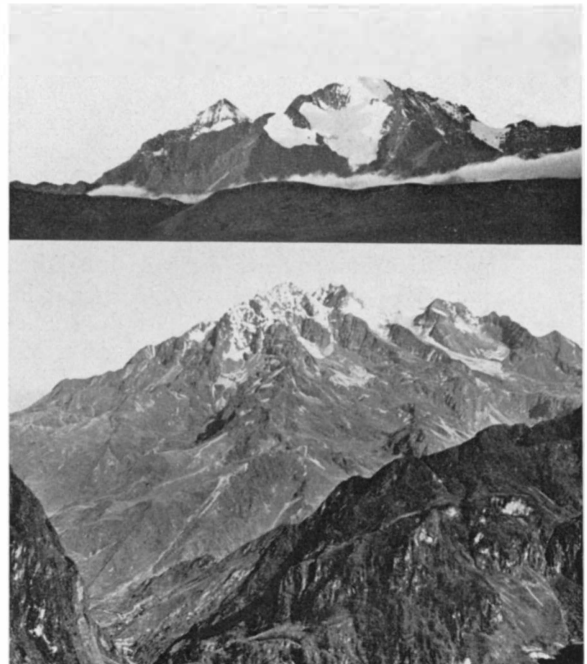


Photo 7: Die Santa Vera Cruz mit ihrem deutlichen Gegensatz des rezenten Vergletscherungsausmaßes – oben: Westabdachung, unten: Ostabdachung (Photo: JORDAN 12. 5. 1977, Tele/8. 4. 1977)

The Santa Vera Cruz with its distinct contrast of the recent extent of glaciation – above: western slope, below: eastern slope (Photo: JORDAN 12. 5. 1977, tele/8. 4. 1977)

Anden zu keiner Jahreszeit nennenswerte Niederschläge von Westen.

So ergibt sich die typische von Nordwest nach Südost über die Anden verlaufende Anordnung der Isohyeten mit von über 2000 mm am nordöstlichen Gebirgsabfall auf unter 200 mm mittleren Jahresniederschlag abnehmenden Werten auf dem Südtiplateau (vgl. Abb. 1), womit bei der vorgegebenen Höhenanordnung eindeutig die regionalen Niederschlagshöhen für die Gletscherverteilung verantwortlich sind und andere Faktoren nur noch modifizierende Wirkung haben. Zu den in der Regel aus Nordost kommenden

Niederschlägen stehen allerdings die weitgehend gletscherfreien oder im Hinblick auf Gletschervorkommen doch zumindest stark benachteiligten Ost-Expositionen im Widerspruch. Hier kann die von HERZOG und



8



9

Photo 8: Der vergletscherte Vulkankegel des Sajama (6542 m) in der Westkordillere Boliviens – aus nördlicher Sicht (Photo: JORDAN 6. 5. 1977)

The glaciated volcanic cone of the Sajama (6,542 m) in the Western Cordilleras of Bolivia – from a northern viewpoint (photo: JORDAN 6. 5. 1977)

Photo 9: Die Firn- und Gletscherkuppen der Payachatas (ca. 6300 m) in der Westkordillere an der Grenze zwischen Bolivien und Chile (aufgenommen vom Sajama). Deutlich ist der Höhenunterschied der Schneegrenze zwischen Westhang (links) und Osthang (rechts) sichtbar (Photo: JORDAN 8. 5. 1977)

The snow and glacier summits of the Payachatas (c. 6,300 m) in the Western Cordilleras at the border between Bolivia and Chile (taken from the Sajama). The altitudinal difference between the snow-line and the western slope (left) and the eastern slope (right) is clearly visible (photo: JORDAN 8. 5. 1977)

TROLL gegebene Deutung mit dem tageszeitlichen Niederschlagsverlauf durch eigene Beobachtungen nur unterstrichen werden, wonach die erst gegen Mittag zunehmende Bewölkungsverdichtung in der Gipfelregion mit nachfolgenden Niederschlägen die ost- und nordostexponierten Hänge durch den vormittäglichen Sonnenstand stark strahlungsbegünstigt. Dies gilt im Ostkordillerenbereich auch an vielen Tagen der trockenen Jahreszeit. Hierin läßt sich zugleich die große Bedeutung von Strahlung und Temperatur und ihre bewölkungs- und niederschlagsabhängige Beeinflussung für den tropischen Gletscherhaushalt erkennen. Dabei ist es inzwischen eine allgemein bekannte Tatsache, daß der Jahresverlauf des Temperaturganges für die eigentlichen Vorgänge in der Natur der Tropen wenig aussagefähig ist, wengleich die jahreszeitlichen Temperaturunterschiede in Bolivien, weil im Randbereich der Tropen gelegen, bereits an Einfluß gewinnen.

Mit dem TROLLSchen Isolethendiagramm für Oruro lassen sich die thermischen Gegebenheiten für den bolivianischen Hochgebirgsraum am zutreffendsten charakterisieren (Abb. 4). Derartige Daten aus dem unmittelbaren Gletschergrenzbereich sind bisher in Bolivien nicht verfügbar.

Die Dichte des überwiegend horizontalen Isolinienverlaufs verdeutlicht die starken Tagesschwankungen der Altiplanostation und die vergleichsweise zu Breitenlagen der Alpen geringe Jahresschwankung. Mit einer angenommenen Anhebung der Station auf ca. 5000 m, also etwa das Niveau der rezenten Gletschergrenze, ergäbe sich bei einem vertikalen Temperaturgradienten von 0,7–0,9°C/100 m (KESSLER 1963) eine

Temperaturerniedrigung von ca. 10°, die bei schematischer Übertragung für diese Höhe einen täglichen Frostwechsel und maximale mittlere Höchsttemperaturen von knapp +8°C in der Mittagszeit, in der Hauptregenzeit von Dezember bis März sogar nur +5–6° erwarten läßt. Wie TROLL (1959) am Vergleich der Stationen von Arequipa und El Misti (Peru) zeigt, ändert sich dabei der Verlauf der Isolinien nicht grundsätzlich. Bei aller Fragwürdigkeit, die die Verwendung von Mittelwerten mit sich bringt, charakterisieren die Temperaturangaben doch ungefähr die reale Situation an der Gletschergrenze und lassen vor allem bei vorhandener Bewölkung noch erheblich niedrigere Temperaturen erwarten.

Ein ganz ähnliches Bild würde sich sicherlich bei der Isolethendarstellung von Strahlungsbilanzwerten ergeben, die leider bisher nur von tropischen Tieflandstationen vorliegen (KESSLER, 1973 und 1975).

Der Gletscherhaushalt

Welche Auswirkungen hat nun dieser im Vergleich zu höheren Breitenlagen völlig andersartige zeitliche Gang des Klimaablaufs auf den Gletscherhaushalt? Ja, kann man überhaupt bei den grundsätzlichen Unterschieden einen sinnvollen Vergleich der Verhältnisse mit Termini, die aus Vorstellungen der zeitlichen Abläufe höherer Breiten erwachsen sind, durchführen?

Zunächst sei dazu die Schneegrenze betrachtet! Grundsätzlich kann man mit TROLL (1959, S. 28) sagen, daß beim Fehlen einer winterlich kalten Jahreszeit auch keine weit hinabreichende winterliche Schnee-

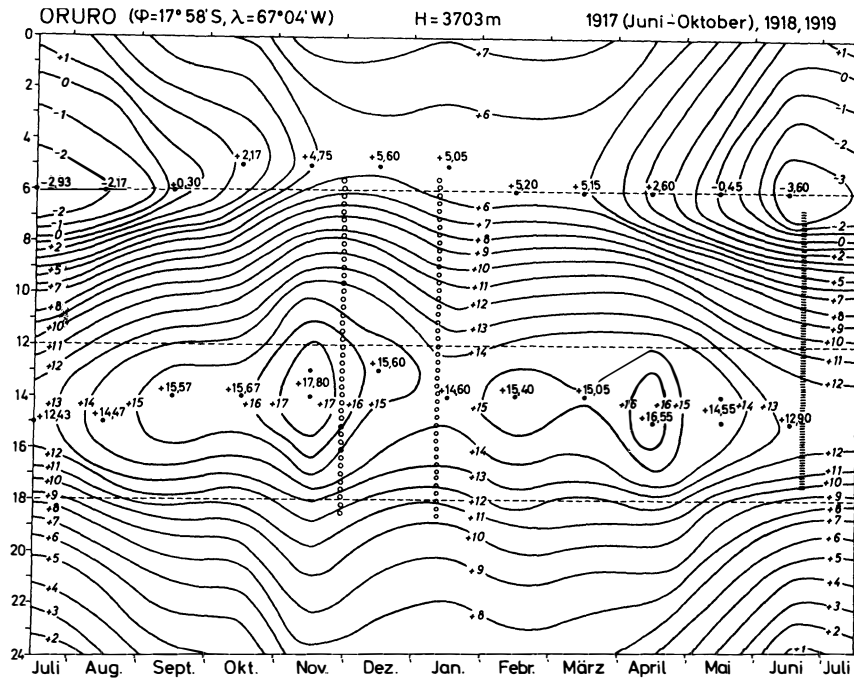


Abb. 4: Thermo-Isoplethendiagramm für Oruro (aus TROLL 1959, S. 23)
Thermo-isopleth diagram for Oruro (from TROLL 1959, p. 23)

decke erwartet werden kann, um so mehr als beim sonnenstanddefinierten Winter in den Tropen Trockenheit herrscht und daher in der Regel keine Schneefälle auftreten. Es können also nur die mit dem Sonnenhöchststand zusammenfallenden sommerlichen Niederschläge eine mächtigere Schneedecke hervorrufen. Die jahreszeitliche Schwankung der Schneegrenze ist demzufolge sehr gering, sie zeigt vielmehr, wie Strahlung und Temperatur, einen ausgeprägten tageszeitlichen Rhythmus. Spätnachmittägliche bis nächtliche Schneefälle können bis auf den Altiplano hinabreichen, sind aber selbst bei Mächtigkeiten bis zu 20/30 cm innerhalb weniger strahlungsreicher Vormittagstunden auf steinigem Untergrund völlig aufgezehrt. Für den Gletscherhaushalt sind diese tageszeitlichen Schneegrenzschwankungen allerdings von untergeordneter Bedeutung, denn die tageszeitliche Grenzlage ist eindeutig durch den Energieumsatz der direkten Strahlung an der Gesteinsoberfläche bedingt und nur geringfügig durch den Transport von fühlbarer und latenter Wärme mitbestimmt und führt auf dem Gletscher nur zur Schneenumkristallisation. Niederschläge in Form von Regen sind randtropischen Gletschern meiner Beobachtung, Erkundung und Erkenntnis nach völlig unbekannt. Eine Tatsache, die auch TROLL (1959) für den El Misti (Peru) bestätigt und FLIRI (1968) aus seinen Überlegungen für die Gletscher der Cordillera Blanca (Peru) ableitet, die aber auch bei Kenntnis des Tropengebirgsklima aus dem Thermoisoplethendiagramm vermutet werden kann. Die temporäre Schneefallgrenze

liegt während der sommerlichen Regenzeit korrespondierend mit dem für die Gletscheruntergrenze beschriebenen S-N-Gefälle der regionalen Differenzierung entsprechend bei maximal 4500 bis 4800 m Höhe und senkt sich mit Annäherung an die kalte Jahreszeit auf üblicherweise ca. 4000 m ab. Von der Stadt La Paz erhalten in der Regel nur die auf dem Altiplano gelegenen Stadtteile eine kurzzeitige Schneedecke. Schneefälle im Bereich des Stadtzentrums bei 3600–3800 m gehören zu den Ausnahmesituationen, die im Durchschnitt etwa alle 5 Jahre auftreten. Schneefälle, wie im Mai 1977, die bis in die tief gelegenen Stadtteile Obrajes, Achumani und Calacoto hinabreichten, sind so selten, daß sich selbst ältere Campesinos nicht an sie erinnern konnten; aber auch sie unterschritten die 3300 m-Grenze nicht. Entsprechende Höhenangaben der Schneefalluntergrenze wurden von diesem Ereignis auch für die Apolobamba und die Tres Cruces gemacht (Tageszeitungen und Servicio de Camino). Die selbstverständlich auch noch in tieferen Lagen auftretenden Nachtfröste sind nur bei wolkenloser Ausstrahlung zu verzeichnen. Sie hängen aber so stark von den örtlichen Gegebenheiten ab, daß regionale Höhenangaben nicht übertragbar sind, während das bei der Schneefalluntergrenze je nach genetischer Ursache des Niederschlagsereignisses bedingt möglich ist.

Niederschläge bedeuten daher im Gegensatz zu höheren Breiten für den gesamten Gletscher stets einen Massengewinn; denn Gletscher mit längeren Zungen, die in ein höheres Temperaturniveau und damit in die

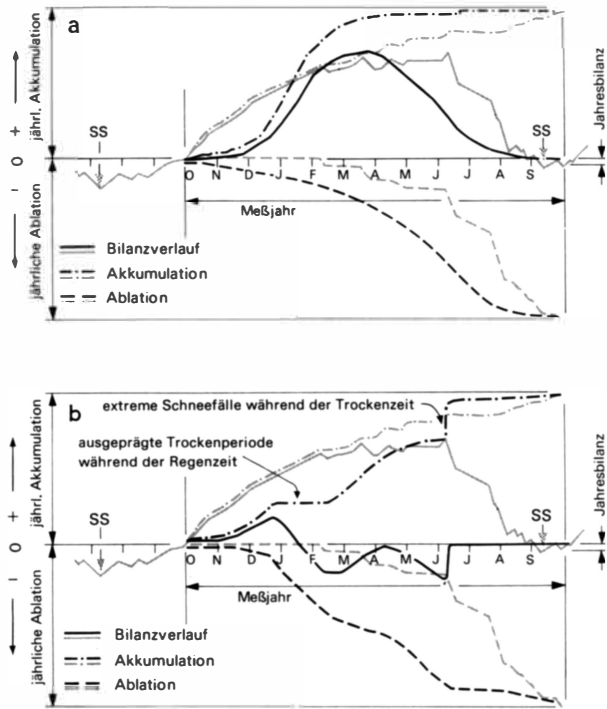


Abb. 5: Kurven des Massenbilanzverlaufes bolivianischer Gletscher (schwarz; a bei regelhaftem, b bei anomalem Witterungsverlauf) im Vergleich mit außertropischen Gletschern (grau). SS = Negativphasen der Bilanz bei starker sommerlicher Ablation

Curves of the course of mass balance comparing Bolivian (black) and extra-tropical (grey) glaciers

Quelle/Source: Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins, UNESCO/IASA 1970, S. 19.

Stufe der Regenniederschläge hinunterreichen, existieren in Bolivien, aber wohl auch in den peruanischen Randtropengebieten, nicht. Massenverlust resultiert demgegenüber aus Zeiten ungehinderten Strahlungsgenusses, der in den Höhenlagen der Tropen nach durchgeführten indirekten Messungen und Beobachtungen relativ zu anderen Energielieferanten offensichtlich noch höher ist, als es bereits für unsere Breiten bekannt ist. Diesen graduellen Unterschieden in den physikalischen Ausgangssituationen steht bei zeitlicher Betrachtung des Wechselspiels zwischen Akkumulation und Ablation wieder ein grundsätzlicher gegenüber, wobei sich im folgenden zunächst auf die Verhältnisse in Bolivien beschränkt werden soll.

Bei regelhaftem Klimaablauf können wir bei Massenhaushaltsuntersuchungen randtropischer Gletscher sowohl das natürliche als auch das hydrologische Meßjahr heranziehen; denn die höchste Lage der Altschnee-, Firn- und Gleichgewichtslinie wird am Ende der Trockenzeit im Verlaufe des Monats August bis September (Abb. 5) erreicht. Die Akkumulation setzt mit Beginn der Regenzeit, also in der wärmeren

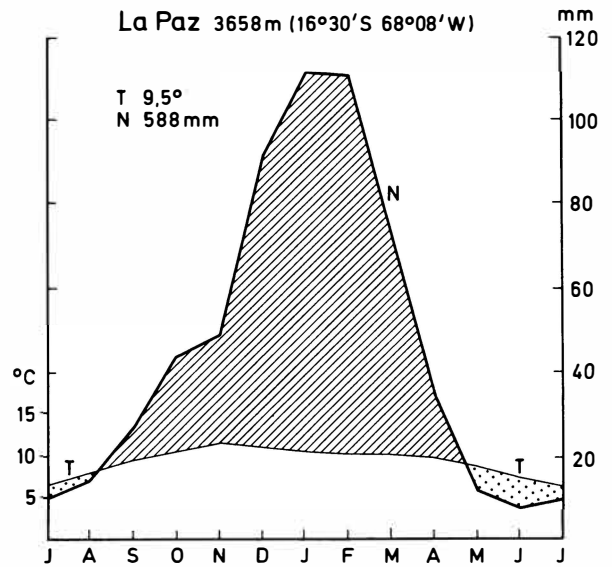


Abb. 6: Klimadiagramm für La Paz – Bolivien nach der Methode von H. WALTER aus Daten des Servicio Meteorologico La Paz

Climatic diagram for La Paz – Bolivia according to H. WALTER's method from data of the Servicio Meteorologico La Paz

Sommerzeit, ein und erreicht als Summenkurve ihre größte Steigung in den Monaten maximaler Niederschläge von Dezember bis Februar, flacht dann bis Ende April stark ab und bleibt bis September ohne merklichen Zuwachs.

Die Ablationskurve steigt langsam, mehr oder weniger kontinuierlich wegen zunächst recht hoher Bewölkung, später dann stärker einhergehend mit Schneefällen, steigert sich schließlich ab März bis zu höchsten Werten in der kälteren Jahreszeit von Mai bis Juli/August, um dann wieder abzufachen. Entsprechend die jeweiligen Summenwerte der Bilanzkurve, also insgesamt ein durchaus ähnlicher Verlauf, wie man ihn für Alpengletscher feststellen kann, mit dem kleinen Schönheitsfehler, daß man sich auf der Südhalbkugel befindet und damit die Kurvenphase, d. h. die Monatszuordnung, um ein halbes Jahr verschoben sein müßte. Dabei ist unter regelhaftem Klimaablauf der Wetterablauf eines Jahres zu verstehen, wie ihn die Interpretation von Monatsmittelwerten einer bolivianischen Hochlandstation gemeinhin erwarten läßt (Abb. 6). Es würde demnach eine ausgeprägte Trockenzeit von Mai bis August von einer ebensolchen Regenzeit von Dezember bis März zu trennen sein, die durch Monate mäßiger Niederschläge verbunden wären. Die Niederschlagsverteilung innerhalb der Monate spielt eine untergeordnete Rolle.

Nun ist aber leider die primär allein auf Niederschlagsschwankungen zurückgehende Variabilität der Massenbilanz tropischer und insbesondere der rand-

tropisch peruanisch-bolivianischen Gletscher erheblich größer als das zunächst den Anschein hat (MONHEIM, 1956, S. 36/37). Sie ist eindeutig auch größer als bei den nichttropischen Gletschern, weil sie zu jedem Zeitpunkt des Jahres an jedem beliebigen Punkt wie auch in der Bilanz für den gesamten Gletscher negatives Vorzeichen annehmen kann, was beim außertropischen Gletscher nur zum Ende oder zu Beginn eines hydrologischen Meßjahres vorkommt. Dies sei im folgenden ausführlicher erläutert und näher begründet.

Im Bereich der ITC, zunehmend zu ihren Rändern, in die der Raum Boliviens während des Sommers einzuordnen ist, gehört es zur Normalerscheinung, daß die vorherrschend konvektiven Niederschläge von mehr oder minder langen Trockenphasen unterbrochen werden. Diese können bei zeitlich langer Dauer, zumal sie in einen üblicherweise positive Bilanzen verursachenden Jahresabschnitt fallen und da sie überdies zum, wenn auch schwach ausgeprägten jahreszeitlichen Temperaturmaximum auftreten, mehrere positive Jahresbilanzen zunichte machen, wie im Januar/Februar 1977 geschehen, wo Spaltensysteme freigelegt wurden, die im August 1975 völlig unsichtbar waren.

Auch in der winterlich passatischen Zirkulation treten episodisch, aber des häufigeren, allgemein und regional Störungen auf. Als solche sind für Südamerika weit äquatorwärts reichende Kaltlufteinbrüche bekannt, wie ich sie leider kurz vor meiner Rückreise Ende Mai 1977 in La Paz mit verheerenden Schneefällen miterleben mußte. Ähnliche, niederschlagsbringende Zirkulationsanomalien stellen die bekannten easterly waves in der Passatströmung dar, also auch zum Winter und damit während der ablativen Trockenzeit. Diese Neuschneefälle haben zur Konsequenz, daß durch Erhöhung der Albedo, noch dazu, wo sie mit der kühleren Jahreszeit zusammenfallen und somit nicht im geringsten durch Wärmefluß kompensiert werden können, die Ablation unvergleichbar

stark reduziert wird. Dies um so mehr, weil während dieser Jahreszeit eine exponiert strahlungsbedingte Ablation vorherrscht. Da es bei solchen Ereignissen keine Seltenheit ist, daß über 50, ja bis zu 100 cm Neuschnee fallen, kann eine bereits im Negativen befindliche Massenbilanz ohne weiteres wieder ausgeglichen werden, ja sogar positive Werte erreichen. Diese Verhältnisse sind in der Anomaliekurve der Abbildung 5 dargestellt.

Zur Stützung und weiteren Verdeutlichung dieser Ausführungen sei auf Tab. 1 verwiesen, in der, in Ermangelung mehrjähriger Massenbilanzmessungen an randtropischen Gletschern, die Niederschlagsdaten für die Höhenstation Chacaltaya wiedergegeben sind. Diese Station liegt in 5220 m Höhe und hat im Rahmen ihres noch immer andauernden Meßprogramms für kosmische Strahlung in den Jahren 1960–1965 auch die Niederschläge erfaßt. Bedauerlicherweise wurden diese Niederschlagsmessungen nicht fortgesetzt, so daß die wiedergegebene Meßperiode das einzig verfügbare Datenmaterial im Höhengniveau und Bereich der bolivianischen Gletscher darstellt. Auch wenn wegen der Kürze der Meßdauer längst nicht alle Extreme der möglichen Schwankungen erkennbar sind, so wird an Hand der markierten Werte doch deutlich, wie niedrig die Niederschläge in einzelnen Monaten der Regenzeit und wie hoch sie in Monaten der Trockenzeit ausfallen können. Sie unterstreichen damit den Verlauf der Anomaliekurve in Abb. 5, auch wenn sie nicht das Ausmaß der Extremschwankungen des Jahres 1977 erreichen.

Wegen der Ungewißheit des Jahresverlaufs der Massenbilanz kann in der Praxis das natürliche Haushaltsjahr bei Massenhaushaltsuntersuchungen an tropischen Gletschern keine Verwendung finden, aber auch die praktische Durchführung der Messungen zur Bilanzierung des hydrologischen Meßjahres bereiten wegen des Fehlens der Bezugshorizonte größte Schwierigkeit.

Tabelle 1: Niederschläge der Höhenstation Chacaltaya
Precipitation at the high altitude climatic station of Chacaltaya

Station: Chacaltaya													Länge: S. 16° 19' 25"	
Prov.: Murillo													Breite: W. 68° 10' 02"	
Depto.: La Paz													Höhe: 5220 m	
Jahr	Niederschläge in mm												Summe	
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D		
1960	50,7	23,8	41,2	36,4	20,5	0,0	0,0	26,5	56,2	51,6	80,9	71,9	459,7	
1961	111,9	164,7	73,7	89,8	43,4	0,0	0,0	8,4	54,3	18,8	81,3	50,5	696,8	
1962	46,4	49,3	93,3	37,2	15,7	0,8	7,5	1,2	40,9	51,1	20,0	117,5	480,9	
1963	117,5	59,6	21,9	73,3	39,3	0,0	0,0	14,4	74,6	25,3	51,3	91,6	568,8	
1964	95,7	53,1	134,9	12,6	7,5	0,0	4,0	22,1	63,7	43,1	47,1	84,1	567,9	
1965	133,4	87,9	59,2	16,0	11,0	2,5	20,6	1,5	52,3	16,7	49,2	120,0	570,3	
Mittel	92,6	73,1	70,7	44,2	22,9	0,6	5,4	12,4	57,0	34,4	55,0	89,3	557,5	

Quelle: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - La Paz

ten, und es ist daher eine zwingende Notwendigkeit, neben der direkten glaziologischen Methode parallel auch die hydrologisch-meteorologische Methode für den gleichen Gletscher anzuwenden. Ferner folgt aus den gemachten Ausführungen, daß die Bestimmung der Gleichgewichtslinie an tropischen Gletschern mit zufriedenstellender Genauigkeit nur in Jahren mit sommerlich regelhaftem Witterungsverlauf erfolgen kann, da anderenfalls die Bezugsflächen für die Jahresbilanzierung fehlen. Dies gilt ebenso für Firn- und Altschneelinie, ja es ist fraglich, ob diese Begriffe in der üblichen Definition angewandt werden können und macht auch die Bestimmung von weltweit vergleichbaren Schneegrenzdaten noch problematischer, als sie ohnehin schon bei außertropischen Gebirgen ist.

Da in den Tropen ein natürliches Haushaltsjahr jederzeit zweifelhaft sein kann, können wir konsequenterweise auch nicht die Firnlinie als höchste Lage der temporären Schneegrenze am Ende des Haushaltsjahres definieren. Oder anders ausgedrückt: weil sich der Begriff in der gegebenen Definition in den höheren Breiten vielerorts als zweckmäßig erwiesen hat, kann er in den Tropen keine Verwendung finden oder doch nur, wenn es sich um klimatische Regeljahre handelt, in denen die Gletscher im Sommer keine längeren Negativbilanzphasen durchlaufen. Aus Praktikabilitätsgründen sollte man besser den Begriff in den Tropen fallenlassen, da seine Zulässigkeit nur durch systematische und kontinuierliche Gletscherbeobachtung des entsprechenden Haushaltsjahres bestätigt werden kann und diese Beobachtungen von den Tropengletschern ohnehin nicht vorliegen.

Demzufolge ist eine enge Korrelation zwischen einer bestimmten „leicht“ feststellbaren Schneegrenzlage und der Gleichgewichtslinie nicht möglich, sondern letztere muß in jedem Falle direkt oder mit anderen Methoden indirekt bestimmt werden, wobei die Gültigkeit dieser Methoden im Tropenbereich noch zu belegen wäre. Entsprechend ist auch die Festlegung des AAR-Wertes (Akkumulationsflächenverhältnisse) nicht praktikabel.

Dies hat natürlich ganz enorme Konsequenzen für die Gletscherinventur (JORDAN, 1979), denn beim Ausfall von Firnlinien- und AAR-Wert-Angaben ist der Zugang zur Gletscherklimabeziehung erheblich reduziert, und es ist daher um so vordringlicher, daß zumindest an einem tropisch-randtropischen Gletscher kontinuierliche Massenhaushaltsuntersuchungen durchgeführt werden, damit bei dem grundsätzlich andersartigen jährlichen Massenbilanzverlauf wenigstens ein Parameter vorhanden ist, auf den sich bezogen werden kann.

Ausblick

Wenn die bisherigen Untersuchungen auch diese bedeutsamen Grundlagen randtropischer Gletscherhaushalte zutage gefördert haben, so sind die z. Zt. vor-

liegenden quantitativen Erhebungen bezüglich der Massenhaushaltserfassung doch nur eine Schneeflocke im gesamten Gletscher. War ursprünglich zu hoffen, durch die Erfassung eines Haushaltsjahres durch zweimalige Messungen zu Ende der Trockenzeit im August-September sowie durch eine vergleichende Meßserie zur Regenzeit wesentliche Aussagen zu Größenordnungen randtropischer Gletscherhaushaltsumsätze machen zu können, so zeigen die dargelegten Tatsachen, daß mehr noch als an außertropischen Gletschern längerfristige kontinuierliche Beobachtungen und Messungen notwendig sind, um aussagefähige Zahlenangaben über Massenumsätze an tropischen Gletschern vorlegen zu können. Wie die Ausführungen allerdings verdeutlichen, fügt sich andererseits, wie zu erwarten, auch der Gletscherumsatz dieser Zone in die von TROLL (1959 u. a.), LAUER (1975) u. a. charakterisierten Klimaabläufe der Tropenregion zwanglos ein, wenngleich der tagesperiodische Zyklus an den randtropischen Gletschern zugunsten einer „Autonomen Periodizität“ im Sinne einer Interferenz von hygrischbedingten jahreszeitlichen und temperaturbedingten tageszeitlichen Phänomenen zurücktritt, wie wir es ähnlich von den pflanzenphänologischen Erscheinungen insbesondere der oberen Höhenstufen in den Tropen kennen.

Offen bleibt bisher jedoch, ob sich die für die Randtropen festgestellten Tatbestände auch auf die Gletscher der inneren Tropenregion übertragen lassen. Dabei wäre es wünschenswert, neben den für die nahe Zukunft vorgesehenen kontinuierlichen Beobachtungen und Meßreihen an einem randtropisch-bolivianischen Probegletscher auch ähnliches an einem Gletscher der inneren Tropen durchzuführen.

Literatur

- AHLFELD, FEDERICO E.: La Cordillera de Quimsa Cruz, in: Zschr. d. Dt. u. Österr. Alpenver., Jg. 63, 1932, S. 79–94.
- : Geographia Fisica de Bolivia, La Paz/Cochabamba, 239 S., Enciclopedia Boliviana, Bd. 16, 1969, 3. Aufl. 1973, 248 S.
- : Geologia de Bolivia, Rh. Enciclopedia Boliviana, La Paz/Cochabamba, 1972, 190 S.
- ALLISON, Jan: Form und dynamisches Verhalten des tropischen Gletscher von Iran Yava, New Guinea, in: Zs. f. Gletscherkde, Bd. 10, 1974, S. 129–152.
- CAUKWELL, R. A., & HASTENRATH, ST.: A new map of Lewis Glacier, Mount Kenya, in: Erdkunde, Bd. 31, H. 2, 1977, S. 85–87.
- CHARNLEY, F. E.: Some Observations on the Glaciers of Mt. Keyna, in: J. Glac., 3 (26), 1959, S. 480–492.
- FLIRI, FRANZ: Beiträge zur Hydrologie und Glaziologie der Cordillera Blanca (Peru), in: Veröff. d. Uni. Innsbruck 1 / Alpenkd. Studien H. Kinzl Festschrift, 1968, S. 25–51.
- GRAF, K.: Geomorphologische Studien in den Anden und auf dem Altiplano Boliviens, in: Ztschr. Soc. Geol. No. 21, La Paz/Bol., 1975.

- HASTENRATH, STEFAN: Heat-Budget Measurements on the Quelccaya Ice Cap, Peruvian Andes, in: *Journal of Glaciology*, Vol. 20, Nr. 82, 1978, S. 85–97.
- HAUTHAL, R.: Gletscherforschung in Bolivien, Peru und Ekuador, in: *Petermanns Geogr. Mitt.*, Jg. 1905, S. 288; 1906, S. 144.
- : Zur Geschichte der glazialen Erforschung Südamerikas, in: *Pet. Mitt.*, 1908, S. 116–121.
 - : Reisen in Bolivien und Peru (ausgeführt 1908), 247 S., Leipzig 1911.
- HERZOG, TH.: Die bolivischen Kordilleren, in: *Pet. Mitt.* 1913 I, S. 192–195, 247–250, 304–308.
- : Vom Urwald zu den Gletschern der Kordillere; 2 Forschungsreisen in Bolivien, Stuttgart 1913.
 - : Beiträge zur Kenntnis von Tektonik und Glazial der bolivianischen Ostcordillere, in: *Geol. Rdsch.*, Bd. V, H. 5 u. 6, 1914, S. 353–371.
 - : Baum- (Wald) und Schneegrenze in den Kordilleren von Südamerika, in: *Geogr. Mitt. f. Thüringen*, Bd. 39, 1931, S. 77–89.
- HOWELL, W, E.: Some Measurements of Ablation, Melting and Solar-Absorption on a Glacier in Peru, in: *Transactions Americ. Geophys. Union*, Vol. 34, 1953, S. 883–888.
- HUMPHRIES, D. W.: Preliminary Notes on the Glaciology of Kilimanjaro, in: *J. Glac.*, 3, 26, 1959, S. 475–579.
- JORDAN, E.: Boliviens Gletscher als Grundlage für die wirtschaftliche Nutzung, in: *Zeitschrift d. Deutsch-Bolivianischen Industrie- und Handelskammer*, H. 3, 1978, S. 13–25.
- : Die wirtschaftliche Bedeutung der Gletscher Boliviens, in: *Zeitschrift der Deutsch-Bolivianischen Industrie- und Handelskammer*, 1978, H. 4, S. 37–39 und 1979, H. 1, S. 30–39 u. Titelbild.
 - et al.: The glacier Inventory of Bolivia, in: *IAHS*, 1979, No. 126, S. 25–32.
- KESSLER, ALBRECHT: Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien) während des Hochstandes der letzten Vereisung, in: *Erdkunde*, Bd. 17, 1963, S. 165–173.
- : Zur Klimatologie der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche, in: *Erdkunde*, Bd. XXVII, H. 1, 1973, S. 1–10.
 - : Über den Tages- und Jahresgang der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche in verschiedenen Klimaten der Erde, in: *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Technischen Universität Hannover*, Nr. 10, 1975, S. 103–123.
- KINZL, H.: Gletscherkundliche Begleitworte zur Karte der Cordillera Blanca (Peru), in: *Zs. f. Gletscherkunde*, Bd. 28, H. 1/2, 1942, S. 1–19.
- : La glaciation actual y pleistocenia en los Andes Centrales, in: *Colloquium Geographicum*, H. 9, 1968, S. 77–91, Bonn
 - : Gründung eines glaziologischen Institutes in Peru, in: *Zschr. f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie*, Bd. VI, H. 1–2, 1970, S. 245–246.
- LAUER, W.: Vom Wesen der Tropen, Akademie der Wissenschaften und der Literatur-Abhandlungen der math.-naturwiss. Klasse, Mainz, Jg. 1975, Nr. 3, S. 5–51.
- : Zur hygrischen Höhenstufung tropischer Gebirge, in: *Neotropische Ökosysteme (Festschrift H. Sioli)*, Biogeographica Vol. VII, J. Schmithüsen (Hrsg.), The Hague, 1976, S. 169–182.
 - : Timberline Studies in Central Mexico, in: *Arctic and Alpine Research*, Vol. 10, No. 2, 1978, pp. 383–396.
- LLIBOUTRY, L.: *Traité de Glaciologie*, 2 Bde., Paris 1965/66.
- LLIBOUTRY, L. & MORALES ARNAO, B. & SCHNEIDER, B.: Glaciological Problems set by the Control of dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. I, II, III, in: *Journal of Glaciology*, Vol. 18, No. 79, 1977, S. 239–254, 255–273, 274–290.
- MERCER, J. H. & THOMPSON et al.: Peru's Quelccaya ice cape, in: *Antarctic Journal of the United States*, Vol. 10, No. 1, 1975, S. 19–24.
- MEYER, H.: Eiszeit in den Tropen, in: *Geogr. Zeitschr.* Bd. 10, 1904, S. 593–600.
- : In den Hochanden von Ecuador, in: Berlin 1907, 551 S.
- MONHEIM, F.: Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens, in: *Heidelberger Geogr. Arbeiten*, 1956, H. 1.
- MORALES, B.: The Huascarán avalanche in the Santa Valley, in: *Symp. intern. sur les aspects scientifiques des avalanches des neiges*, Publ. No. 69 de l'Assoc. Int. d'Hydrol. Sc., 1966, S. 304–315.
- PETERSEN, M., SASSARI, L. u. PLENGE, R.: Glaciar Yanasinga (Central Peru): 24 years of measurements, in: *J. Glac.*, 8 (54), 1969, S. 487–489.
- PLATT, C. M.: Some Observations on the Climate of Lewis Glacier, Mount Kenya, during the Rainy Season, in: *J. Glac.*, 6, 44, 1966, S. 267–288.
- SIEVERS, W.: Zur Vergletscherung der Cordilleren des trop. Südamerika, in: *Zs. f. Gletscherkunde*, Bd. 2, 1908, S. 271–284.
- : Die heutige und frühere Vergletscherung Südamerikas, in: *Verh. d. Ges. D. Naturf. u. Ärzte*, S. 184–205, Karlsruhe 1911.
- TROLL, C.: Anden und Cordillera Real, in: *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, Bd. 60, Innsbruck 1929, S. 35–53.
- : Die Cordillera Real, in: *Zeitschrift der Ges. für Erdkunde* Nr. 7/8, Berlin 1929, S. 279–312.
 - : Die Übersichtskarte der Cordillera Real Boliviens, in: *Zs. d. Ges. f. Erdkunde*, Berlin 1931, S. 117–124.
- TROLL, CARL, WIEN, K.: Der Lewisgletscher am Mount Kenya, in: *Glaciers and Climate*, Geografiska Annaler, 1949, S. 257–274.
- TROLL, CARL: Die Klimatypen an der Schneegrenze, in: *Actes du IV Congr. Int. du Quat. Rome-Pise 1953*.
- : Die tropischen Gebirge. Ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung, in: *Bonner Geogr. Abh.*, Bd. 25, 1959.
- WEISCHET, W.: Der tropisch-konvektive und der außertropisch advektive Typ der vertikalen Niederschlagsverteilung, in: *Erdkunde* 19, 1965, S. 6–14.
- : Klimatologische Regeln zur Vertikalverteilung der Niederschläge in Tropengebirgen, in: *Die Erde*, 100. Jg., 1969, S. 287–306.
- WHITTOU, J. B.: Some Observations on the Snowfall of Ruwenzori, in: *J. Glac.*, 3, 38, 1960, S. 765–772.
- WHITTOU, J. B., SHEPHERD, A., GOLDTHORPE, J. E. a. TEMPLE, P. H.: Observations on the Glaciers of the Ruwenzori, in: *J. Glac.* 4, 35, 1963, S. 581–616.
- WILHELM, FRIEDRICH: *Schnee- und Gletscherkunde*, Berlin/New York 1975, 434 S.
- Ohne Verfasser*: Combined heat, ice and water balances at selected glacier basins, UNESCO/IAHS, 1970, 20 S.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología* – La Paz div. Klimadaten.

Abb. 2

Bolivien

DIE CORDILLERA REAL

Gletscherverbreitung

Glacier distribution

1:500 000



- vergletscherte Flächen
- Höhenlinien nach photogrammetrischer Auswertung
- Höhenlinien ohne photogrammetrische Auswertung

Quellen: 1. Karten 1: 50 000 und 1: 250 000 des Instituto Geográfico Militar (I. G. M.), La Paz
 2. Troll - Finsterwalder, Karte 1: 50 000, NW-Teil der Cordillera Real, PM 1935
 3. Troll - Hein, Karte 1: 150 000, Die Cord. Real, nördl. Teil, Zs. G.f.E., Berlin 1931
 4. Mapa de Bolivia 1: 1 000 000, I. G. M. 1973
 5. USAF Operational Navigation Chart 1: 1 000 000, 1972
 6. Luftbilder des I.G.M., La Paz; verschiedene Befliegungsreihen
 7. Eigene Geländeaufnahmen 1975 und 1977

