

VORBEMERKUNG

Die folgenden Beiträge von W. LAUER, L. MAHNKE und W. SCHOOP enthalten Forschungsergebnisse, die im nördlichen Hochland Boliviens im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Forschungsvorhabens „Kallawaya-Bergbevölkerung und Ökosysteme“ erarbeitet wurden.

Vertreter mehrerer Disziplinen widmen sich im Rahmen dieses Projektes dem Studium der Lebensformen und der Umwelt einer indianischen Bevölkerungsgruppe – der Kallawaya –, deren Lebensraum nahe der Höhengrenze des Anbaus im Bereich zwischen 3400 m und 4300 m NN liegt.

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Talsystem des oberen Rio Charazani, dort, wo der geschlossene, vergletscherte Gebirgszug der Apolobamba-Kordillere und der Cordillera Real unterbrochen ist und mehrere Quellflüsse die niedrigen Randhöhen des Altiplano erreichen (vgl. Übersichtsskizzen in den jeweiligen Beiträgen).

Ziel der Arbeiten ist es, eine Bestandsaufnahme der traditionsgebundenen Lebensformen, des sozialen Gefüges sowie der natürlichen Voraussetzungen in Vergangenheit und Gegenwart durchzuführen und die Zusammenhänge zwischen menschlicher Aktivität und den Ökosystemen zu untersuchen, ehe eine moderne Infrastruktur die Grundzüge des bisherigen präkolonial und kolonial geprägten Lebensraumes und Landschaftshaushaltes vollends zu verschleiern, aufzulösen und damit auszulöschen beginnt.

Seit der ersten Exploration im Herbst 1977 durch den Münchener Botaniker PAUL SEIBERT und den Bonner Geo-

graphen WILHELM LAUER haben Forschergruppen der Geobotanik, der Bodenkunde und von Teilzweigen der Geographie (Klimatologie, Geomorphologie, Agrargeographie und Wirtschaftsgeographie) mit ihren Studien begonnen. Ethnologie und Ethnohistorie sollen folgen.

Von den Forschungsaufenthalten der Jahre 1979 bis 1982 liegen einige allgemeine Berichte und Ergebnisse einführender Studien vor, aus denen die Anlage des Projektes, die Arbeitsziele und die Beteiligung der Arbeitsgruppen hervorgehen^{*)}. Ein erstes Symposium, auf dem vorläufige Ergebnisse diskutiert wurden, fand im Mai 1982 in Aachen statt.

Mit den hier abgedruckten Aufsätzen werden erste wissenschaftliche Teilergebnisse der Klimatologie sowie der Agrar- und Wirtschaftsgeographie vorgelegt. W. L.

^{*)} LAUER, W.: Im Vorland der Apolobamba-Kordillere. Physisch-geographische Beobachtungen auf einer kurzen Studienreise nach Bolivien. In: HARTMANN, R., OBEREM U. (Eds.): Estudios Americanistas II, Homenaje a H. Trimborn. Coll. Inst. Anthr. 21 St. Augustin 1979, S. 9–15.

SCHOOP, W.: DFG-Projekt „Kallawaya-Bergbevölkerung und Ökosysteme“. In: Universitas, Vol. 37, No. 5, 1982, S. 509–514.

SEIBERT, P.: Die Callawaya-Indianer: Ein Relikt des Inkareiches. Anpassung an die Lebensbedingungen des Hochgebirges. In: Forschung. Mitt. d. DFG, 4, 1981, S. 6–9.

– : Ökosystemforschung in den bolivianischen Anden. In: Naturwiss. Rdsch., 35. Jg., H. 4, 1982, S. 147–157.

ZUR ÖKOKLIMATOLOGIE DER KALLAWAYA-REGION (BOLIVIEN)

Mit 15 Abbildungen, 2 Tabellen und 4 Photos

WILHELM LAUER

Summary: On the Eco-Climatology of the Kallawaya-Region (Bolivia)

The following paper deals with the description of the climatic conditions in the Kallawaya-Region (North-Bolivia), which have a strong influence on the life and the economy of the population. The marked contrast between the rainy season in summer and the dry season in winter, as well as several peculiarities of the meso-climate operate on vegetation and land use. Based on insolation and the position of the sun as astronomical factors, the potential solar radiation of the area under investigation was calculated and compared with the actual one measured at the reference station Charazani (3,300 m a.s.l.). The maps show a clear spatial difference between slopes exposed to the north with radiation surplus and slopes exposed to the south with radiation deficit.

In accordance with the rates of insolation the soil temperature at 50 cm depth was used as a micro-ecological measure of heat, uninfluenced by the course of the day. With the help of a larger group of these measurements an actual thermic-spatial classification was worked out for the end of the dry season. Furthermore it was possible to construct models for the variation of soil temperatures as a function of inclination, exposition, and elevation – for a specific elevation (3,000 m) even for several points of time in the course of a year.

Several gradients of temperature versus altitude, partly depending on exposition, were calculated from soil temperatures, which depend on height. Their values were similar to those of the air temperature gradients. The generally linear decline of the temperature according to altitude is only disturbed by two mesoclimatic

phenomena: the regular accumulation of cold air in the morning (below 3,200 m), which can be registered in the air temperature as well as in the soil, and a frequent inversion-layer of varying thickness between 3,400 m and 4,100 m elevation.

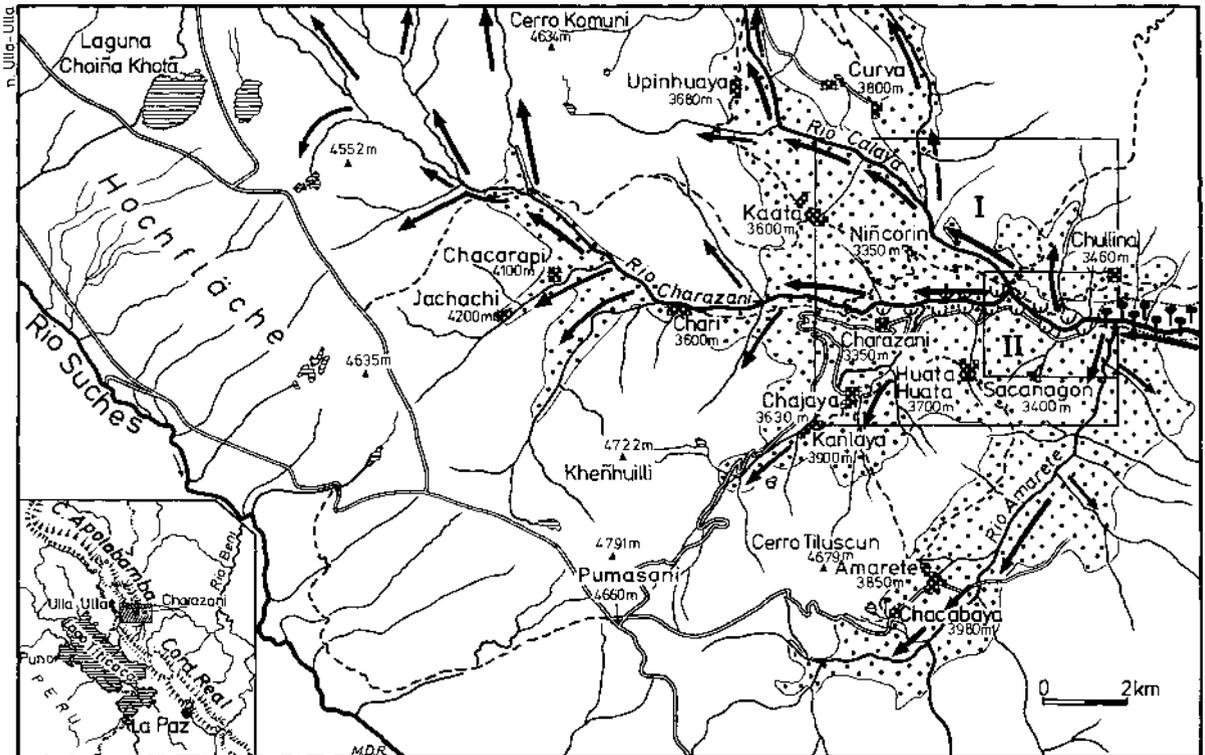
Resulting from these meso- as well as micro-climatic factors, clear altitudinal limits for vegetation and land use exist, differing according to the exposition and the inclination of the slopes.

Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Norden des bolivianischen Ostkordillernsystems im Bereich des Muñecas-Berglandes am Südfuß der Apolobamba-Kordillere im Talsystem des oberen Rio Charazani. Dessen weitverzweigte Quellflüsse werden teils von den Gletscherbächen der Apolobamba-Kordillere und teils von den niedrigeren, unvergletscherten Höhen einer schmalen Wasserscheide zwischen dem Muñecas-Bergland und dem Titicaca-Becken gespeist. Das Talsystem durchbricht in einem tief eingeschnittenen,

streckenweise trockenen Durchbruchstal den an dieser Stelle aufgelösten Kordillerezug zwischen der Cordillera de Apolobamba und der Cordillera Real und fließt schließlich über den Mapiri-Fluß dem Rio Beni und damit dem Amazonas-System zu. Der engere Untersuchungsraum liegt im noch wenig erschlossenen Wohngebiet der Kallawayas, einer Ketschua-sprechenden Bevölkerungsgruppe inmitten des Ayмара-Siedlungsgebietes mit traditionsgebundenen Lebensformen aus vorspanischer und kolonialer Zeit (Abb. 1).

Der Untersuchungsraum ist außerordentlich reliefbetont und liegt oberhalb der Waldgrenze in der subandinen Höhenstufe zwischen 2800 m und 4660 m NN. Die Indios haben deshalb an den steilen Hängen künstliche Terrassen angelegt, auf denen sie ihre Feldfrüchte Kartoffel, Oca, (*Oxalis tuberosa*), Papa lisa (*Ullucus tuberosus*), Bohnen, heute überdies Weizen und Gerste anbauen. In den tiefer eingeschnittenen Talböden, im Bereich des kleinen zentralen, von den Spaniern errichteten Bezirksortes Charazani, unterhalb von 3500 m, wird auch Mais angebaut, der in der winter-



- ⊙ Anbaustufe vorw. Terrassenkulturen
- ↑↑ trop. Höhenwald
- ωω trockener Talgrund
- Talwind
- befahrbarer Weg
- ⋈ Fußpfad
- I Ausschnitt der Abb. 8,12,14
- II Ausschn. Abb. 9

Abb. 1: Übersichtskarte des Arbeitsgebietes
Survey map of the area under investigation

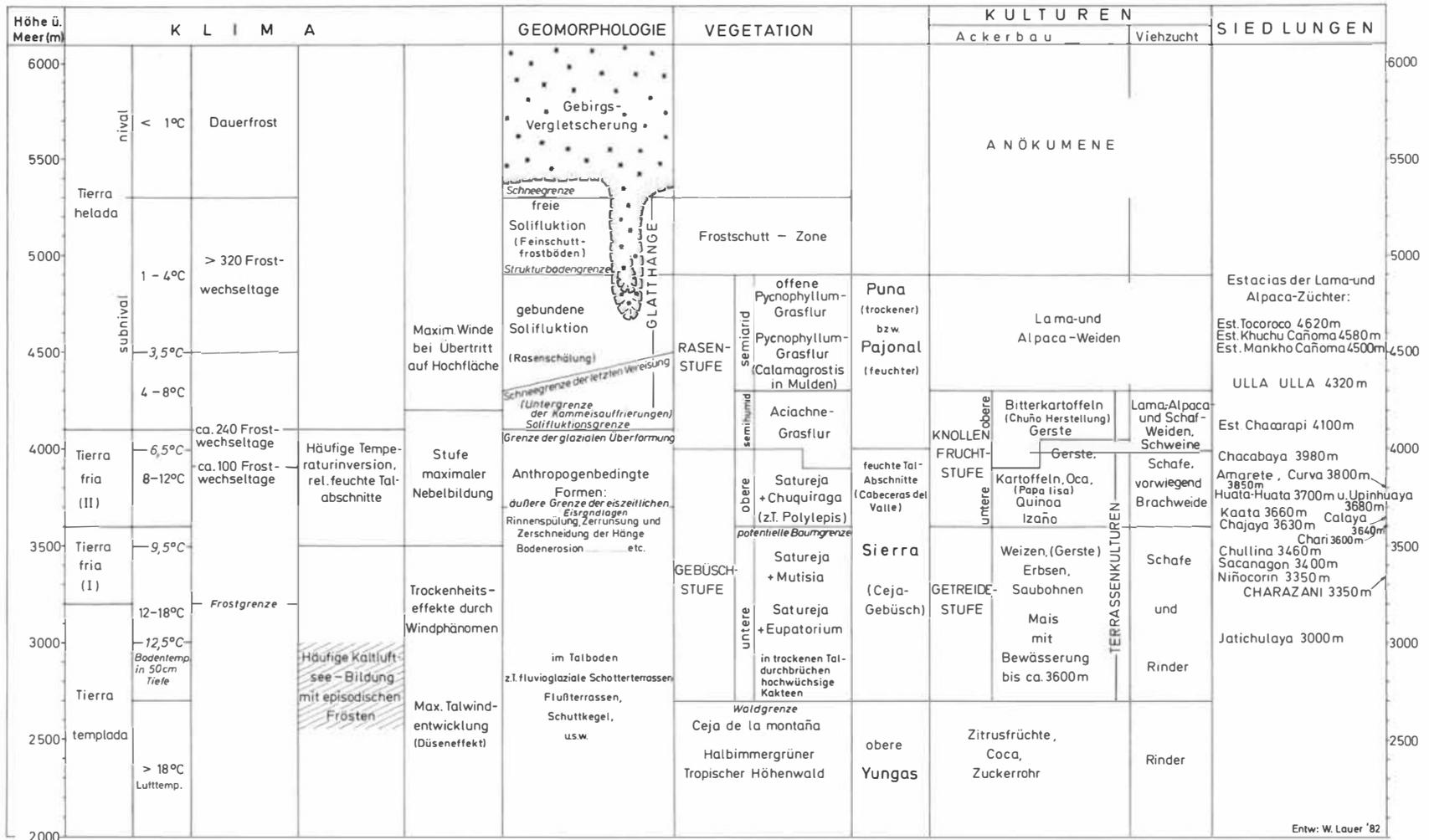


Abb. 2: Klimaökologische Höhenstufung des Charazani-Berglandes
Eco-climatic altitudinal belts of the Charazani-Region

lichen Trockenzeit bewässert wird. Oberhalb der Anbaugrenzen über 4100/4300 m halten die Kallawayas Lamas, Alpacas, Schafe und Ziegen. Die Dörfer liegen auf Terrassen, Verebnungen und an weniger steilen Hängen mitten in den Fluren, die durch viele Pfade erschlossen sind.

Der vertikale Klimawandel in seiner vielfältigen Ausprägung hat eine Höhenstufung der Vegetation und des Anbaus zur Folge. Die klimatische Höhengliederung ist in erster Linie thermisch bedingt. Die Strahlungsexposition schafft thermische Unterschiede auf kleinem Raum. Die thermische Höhengliederung interferiert mit einer Feuchtigkeitsabstufung. Trockene Talböden und Hänge mit großer Nebelfeuchtigkeit wechseln einander ab. Ein Tal-/Bergwind-System ist mit hoher Regelmäßigkeit ausgebildet.

Die aktuelle Waldgrenze liegt im Bereich der Charazani-Talung bei ca. 2700 m Höhe. Die potentielle Obergrenze des Waldes dürfte aber erst in Höhen von 3400 m bis 3600 m zu suchen sein, wo heute Reste einheimischer und eingeführter Baumarten meist im Schutz der Dörfer angetroffen werden. Die heutige Waldgrenze wird von einem halbimmergrünen Höhenwald gebildet. Sie zeigt Spuren großer Zerstörung infolge von Holzentnahme und Brandrodung. Es ist auch möglich, daß im Charazani-Gebiet die örtliche Trockenheit dieses Talabschnittes eine tiefere Lage der Waldgrenze bedingt, eine Tatsache, die bisher nicht schlüssig beantwortet werden kann.

Die Höhenstufung der natürlichen Vegetation und des Landbaues folgt im wesentlichen den thermischen Bedingungen bei gegebenen Niederschlagsverhältnissen (sommerliche Regen- und winterliche Trockenzeit). Wegen der Überwärmung der Gebirgsregionen – relativ zum thermischen Zustand der freien Atmosphäre in gleicher Höhe – reicht der Anbau ungewöhnlich weit in die Gebirge hinauf.

Eine vergleichende Übersicht der Höhengliederung natürlicher und kultureller Landschaftselemente gibt Abb. 2 wieder. Sie basiert auf den bisherigen Forschungsergebnissen der an dem Gesamtprojekt beteiligten Wissenschaftler.

Die geländeklimatischen Grundzüge

Im engeren Kallawayas-Gebiet gibt es keine Klimastation. Die nächste Referenzstation liegt auf der Hochpampa von Ulla Ulla in 4460 m Höhe (vgl. Abb. 1). Sie wird seit 1975 als Station des bolivianischen Wetterdienstes betrieben. Registriert werden Terminbeobachtungen der trockenen und feuchten Temperatur, der Windrichtung und -stärke und des Niederschlags. Für die Zwecke des speziellen mikroklimatischen Programms, das vorwiegend darauf abzielt, die räumlichen thermischen Strukturen des reliefintensiven Arbeitsgebietes in Zusammenhang mit den vegetationskundlichen und arargeographischen Untersuchungen zu erfassen, wurde in Charazani im April 1981 eine Station eingerichtet, an der Globalstrahlung, Temperatur, relative Feuchte sowie Windrichtung und -stärke und auch Bodentemperaturen gemessen werden¹⁾.

Die Ablegenheit des Untersuchungsraumes und viele hier nicht zu erörternde Umstände lassen in diesem schwieri-

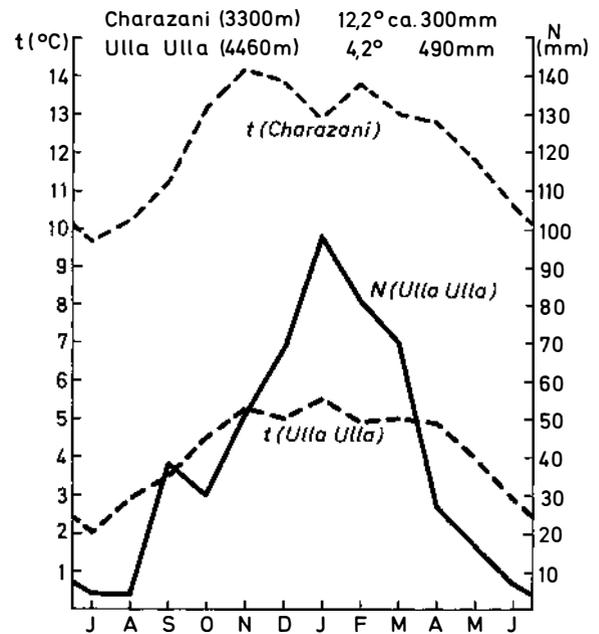


Abb. 3: Klimadiagramme von Ulla-Ulla (N + t) und Charazani (t)
Climatic diagram of Ulla-Ulla (p + t) and Charazani (t)

gen Untersuchungsgebiet nur ein Minimalprogramm der klimatischen Erforschung zu. Messungen im Gelände konnten nur in einzelnen, im Jahresverlauf charakteristischen Kampagnen mit Hilfe von batteriebetriebenen Meßfühlern und einer IR-Sonde durchgeführt werden.

Als allgemeiner mesoklimatischer Rahmen ergibt sich, daß der behandelte Untersuchungsraum, der sich im vertikalen Aufriß zwischen 2700 m und 4650 m erstreckt, ein mittleres Temperaturintervall zwischen ca. 18 °C (2700 m) und 3,5 °C (4650 m) aufweist.

Abb. 3 zeigt das Klimadiagramm der Station Ulla Ulla in 4460 m Höhe, das allerdings nicht vollgültig den Klimatyp des Arbeitsgebietes repräsentieren kann, weil die Station ca. 30 km Luftlinie vom Arbeitsgebiet entfernt auf einer Hochfläche liegt. Charakteristisch ist die Dämpfung der Temperaturkurve in der sommerlichen kurzen Regenzeit als Folge des doppelten Zenitdurchganges der Sonne. Der Temperaturrhythmus mit einer Jahresschwankung von nur 3,4 °C entspricht damit der Norm der äußeren Tropen. Selbst das auf nur einjährigen Messungen beruhende Temperaturdiagramm von Charazani (vgl. Abb. 3) zeigt einen kongruenten Jahresgang mit einer entsprechenden Dämpfung der Tempe-

¹⁾ Ich bin Frau Dr. E. GEYGER (Instituto de Ecología, Convenio U. M. S. A.-Göttingen in La Paz) dankbar für die Überlassung eines Strahlungsschreibers und eines Windschreibers sowie Herrn L. MAHNKE für den Aufbau und die Betreuung der Station Charazani (1981/82).

Tabelle 1: Klimawerte von Ulla Ulla und Charazani / Climatical Data of Ulla Ulla and Charazani

Station	Jahresmitteltemperatur	Temperaturschwankung	Niederschlag	Frostwechseltage		Temperaturgradient
	°C	(Jahr) °C	(Jahr) mm	Hütte	Boden	°C/100 m
Ulla Ulla (4460 m)	4,2	3,4	490	> 280	> 320	0,69
Charazani (3300 m)	12,2	4,6	ca. 300	ca. 10		

raturmaxima während des Sommers. Die Jahresschwankung der Temperatur dürfte in der Talung, wie das Diagramm anzeigt, etwas höher (4,6 °C) sein als auf der Hochfläche.

Die wesentlichen klimatischen Werte beider Stationen enthält die Tabelle 1.

Aufgrund der Niederschlagsmengen kann der gesamte Untersuchungsbereich der semihumiden bis semiariden ‚zer-talten Puna‘ der Nordost-Abdachung des Altiplano zuge-rechnet werden. Die Regenzeit dauert von November bis April, doch fallen erste Niederschläge bereits zwischen August und Oktober. Nur die Zeit von Mai bis Juli ist weitgehend regenlos. Die trockensten Bereiche des Arbeitsgebietes liegen in den tief eingeschnittenen Talgründen des Rio Charazani. Feuchte Inseln bilden die oberen Talenden (*Cabe-ceras de los valles*), wo sich selbst in der Trockenzeit häufig durch tägliche Talwinde Nebel entwickeln.

Im Höhenintervall des beschriebenen Arbeitsgebietes der Charazani-Talung und ihren Randhöhen vollzieht sich der

Übergang von der frostfreien Klimastufe im Bereich der Waldgrenze zur subnivalen Klimastufe, der über 300 Tage Frostwechsel eignen (Abb. 4). Die sogenannten „Frostwechsel-tage“ mit kurzen nächtlichen Minustemperaturen (°C) setzen in ca. 3200 m Höhe ein. Dort treten einige Frosttage am Boden in den Mittwintermonaten Juni/Juli und August auf. In Kaltluftsammlerbecken gibt es Frosttage bereits in tieferen Lagen bis 2700 m abwärts. Zwischen 3800 m und 4200 m erhöht sich die Zahl der Frosttage bereits von ca. 50 auf mehr als 200. Die Frostwechselperiode erstreckt sich nahezu über alle Trockenzeitmonate des Winters zwischen Mai und Sep-tember, um schließlich in Höhen um 4500 m mit wenigen Ausnahmetagen das gesamte Jahr zu umfassen. Die obere Ackerbaugrenze liegt fast genau in den Höhen, in denen die Fröste die Vegetationszeit auf ca. 6 Monate beschränken (ca. 4100 m bis 4300 m NN).

Es fällt auf, daß die Kallawaya, die sich vorwiegend von andinen Knollenfrüchten ernähren, ihre Siedlungen in Höhen zwischen 3600 m und 4200 m anlegten. Diese Tatsache wird verständlich durch ein kulturhistorisch und kulturöko-logisch einmaliges Phänomen: die Konservierung von Knollenfrüchten mit Hilfe des Frostwechsels. Allerdings ist dieses Verfahren nicht nur auf das Kallawaya-Gebiet be-schränkt. In den randtropischen Höhen Perus und Boli-viens, in denen entsprechende klimatische Bedingungen herrschen, wird diese Konservierungsmethode ebenfalls an-gewandt. Die spanischen Chronisten (z. B. CIEZA DE LEÓN 1553) hatten bereits davon berichtet, ebenso die Reisenden des 19. und 20. Jahrhunderts, zuletzt CARL TROLL (1931 und 1943).

Nach der Ernte werden in den Monaten Juni, Juli und August die Knollenfrüchte, z. B. Kartoffel und Oca (*Oxalis tuberosa*) durch abwechselnde Behandlung mit Frost in der Luft bei Tage und fließendem Wasser bzw. Trocknung an der Luft bei Tage zu einem haltbaren Dauerprodukt verfeinert²⁾. Dies-es Verfahren kann am günstigsten in der Höhenstufe ange-wandt werden, in der unmittelbar nach der Ernte häufig ein täglicher Frostwechsel auftritt. Voraussetzung für diese be-sondere Konservierungstechnik von Knollenfrüchten ist ein bereits merklicher Gegensatz von Sommer und Winter, nämlich Frostfreiheit in der feuchten Vegetationszeit (Som-mer) und Frostwechsel in der Trockenzeit (Winter), d. h. al-

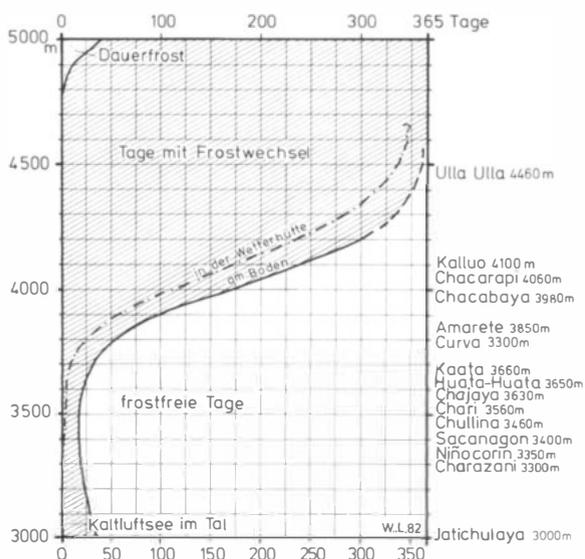


Abb. 4: Höhenabhängigkeit der Frostwechseltage in der Kallawaya-Region

The number of days where temperature oscillates around freezing-point (frost-change days) as a function of altitude in the Kallawaya-Region

²⁾ Über die differenzierten Verfahrensweisen der Konservierungstechnik der Knollenfrüchte bei den Kallawaya berichtet L. MAHNKE ausführlich in seinem anschließenden Beitrag in diesem Heft.

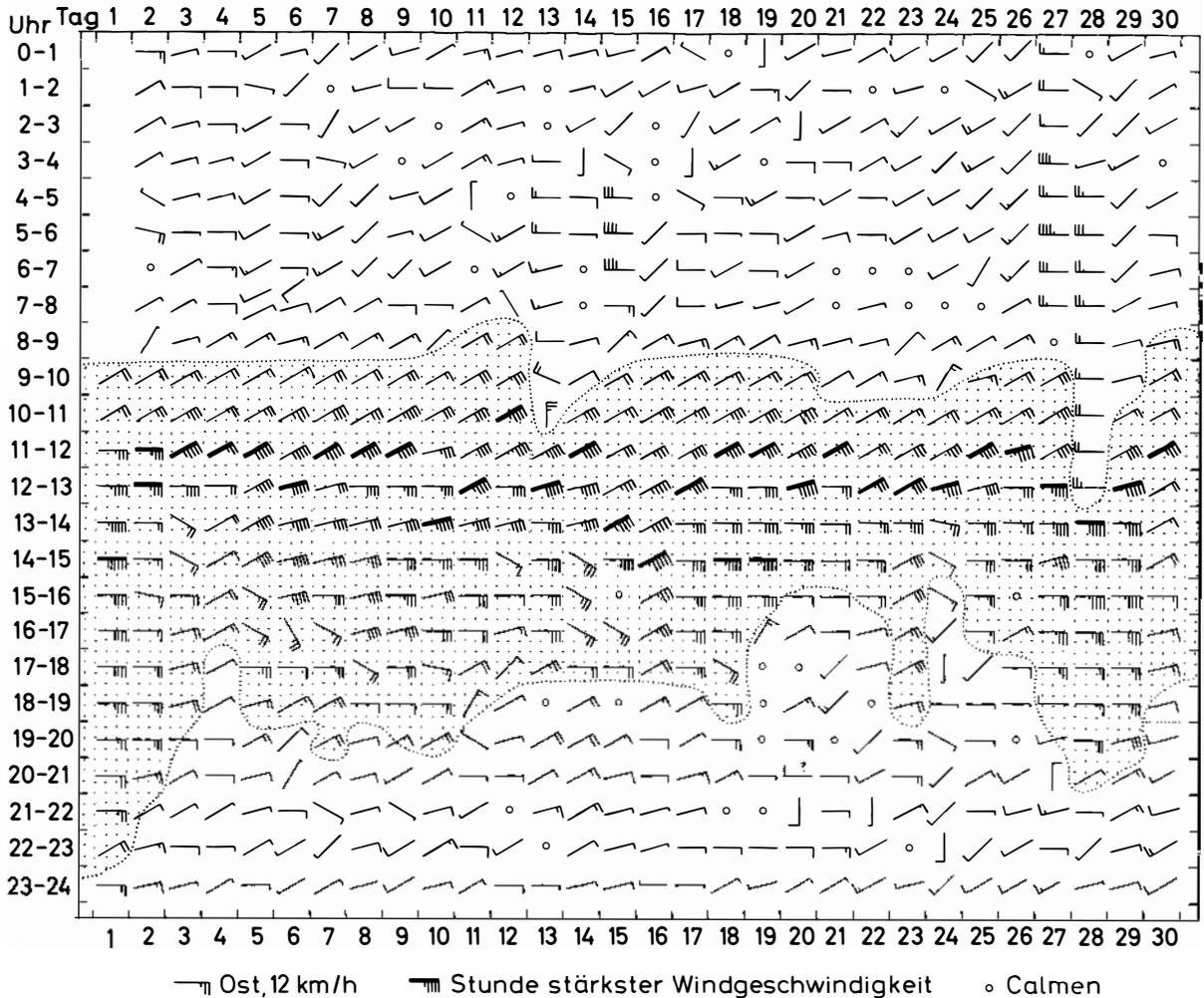


Abb. 5: Windrichtung und Windweg im September 1981 in Charazani

Wind direction and wind speed during September 1981 in Charazani

so der Einfluß außertropischer Witterung in den randtropischen Gebieten Perus und Boliviens. In den inneren Tropen ist dieses Verfahren nicht durchführbar, da die jährliche Temperaturschwankung weitgehend fehlt und daher in allen Jahreszeiten ab einer bestimmten Höhe mit häufigen Frostwechseln gerechnet werden muß und damit ohnehin ein landwirtschaftlicher Anbau ausgeschlossen ist.

Ein weiteres landschaftswirksames klimatisches Phänomen sind die täglichen Talwinde, die nur an ausgesprochenen Regentagen ausbleiben. In den tief eingeschnittenen Durchbruchstalstrecken sind die Talgründe recht trocken ausgebildet, weil über der Talmitte die Windströmung eine absinkende Tendenz hat. An den hochgelegenen Talenden oberhalb von 3200m (*Cabeceras de los valles*) und an den Hängen entwickeln sich jedoch fast täglich gegen Abend oder nachts Nebel, die diese Partien feuchter gestalten. Der Tal-

wind hat einen täglichen Rhythmus (Abb. 5). Er setzt in der Regel zwischen 9 und 10 Uhr morgens schwach ein, erreicht seine höchsten Stärken zwischen 13 und 15 Uhr, manchmal auch etwas später, fällt nach 16 bis 17 Uhr plötzlich ab und legt sich meistens gegen 19 Uhr. Falls bei regenbürtigen Wetterlagen Talwinde auftreten, dauern sie bis 21 Uhr und manchmal sogar bis Mitternacht an. Die mittleren Geschwindigkeiten ausgeprägter Talwinde lagen am Meßstandort bei 3–5 m/sec. Zur Mittagszeit treten Spitzenböen von 10–12 m/sec. auf. Die bisher stärksten Mittel über drei Minuten betragen 25 m/sec.

Das Talwind-Phänomen bei Tage hat in der Regel nur ein schwaches Gegenstück bei Nacht. Die Stärken der Bergwinde schwanken um 1–2 m/sec. In einigen Nächten können sie gegen Morgen maximal 5–6 m/sec. erreichen (Abb. 5).

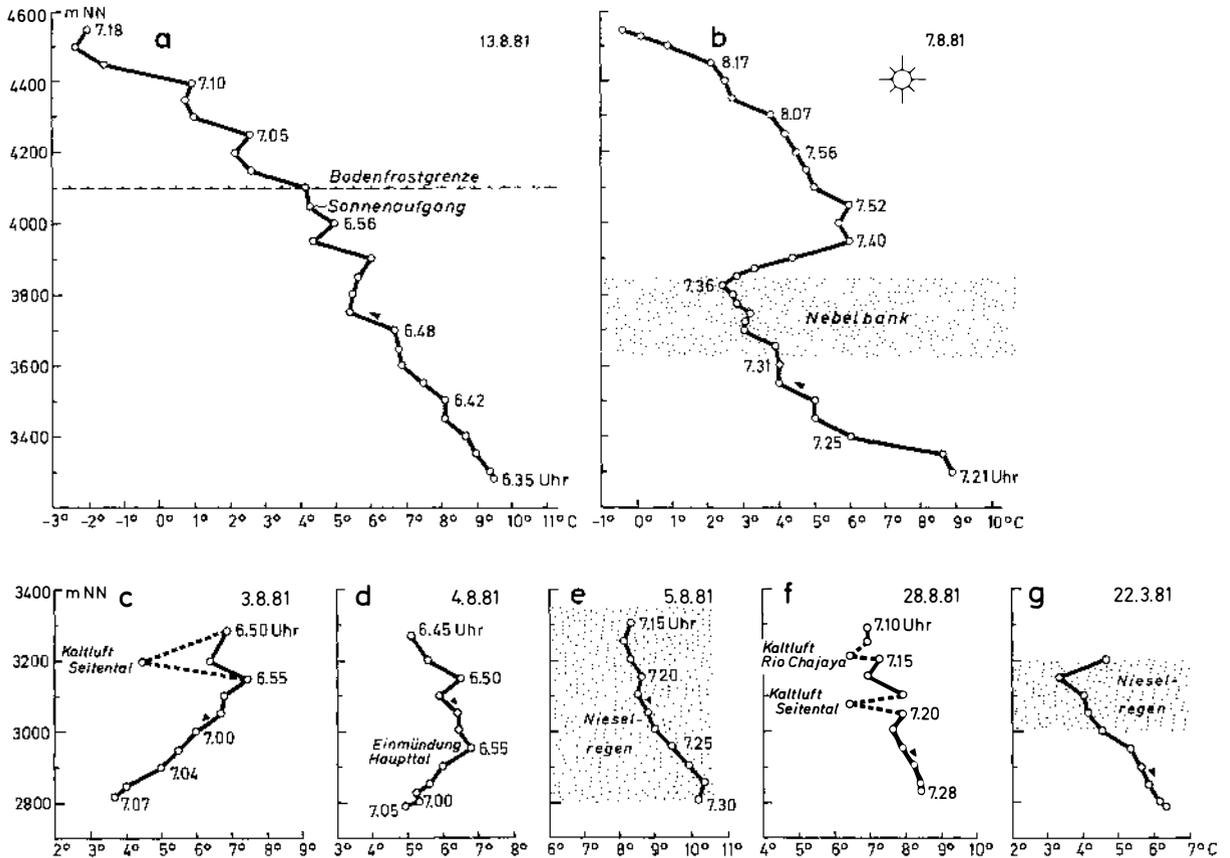


Abb. 6: Temperatur-Meßfahrten / Journeys to measure the temperature

Höhenwandel der Lufttemperaturen (Meßfahrten)

Der vertikale Wandel der Lufttemperaturen wurde durch zahlreiche Meßfahrten in dem Höhenintervall von 2790 m bis 4660 m zu erfassen versucht. Die Meßroute folgte der einzigen geschotterten Landstraße, die vom Paß Pumasani in 4660 m Höhe über den Ort Charazani (3300 m) bis zur Talenge am Ostrand des Untersuchungsgebietes führte (2790 m). Aus technischen Gründen wurden die Fahrten jeweils von dem Ort Charazani entweder bergwärts nach Pumasani oder talwärts von Charazani zur Talenge ausgeführt. Die Messungen wurden bei einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 15–25 km mit Hilfe eines Meßfühlers vorgenommen. Als Meßtermine wurden die Morgenstunden um oder kurz nach Sonnenaufgang gewählt. So ließen sich die geländeklimatisch besonders aufschlußreichen Temperaturverhältnisse des morgendlichen Minimums erfassen und zugleich der einstrahlungsbedingte Fortschritt des Wärmeganges ausschalten.

Bei fast allen Fahrten wurden drei markante Phänomene zur frühmorgendlichen Minimalzeit der Lufttemperatur festgestellt: eine ausgeprägte Temperatur- und Feuchtig-

keits-Inversionsschicht unterschiedlicher Dicke im Höhenintervall von ca. 3400 m bis 4100 m NN sowie eine Kaltluftseebildung infolge der nächtlichen, wenn auch schwachen Bergwinde im Talabschnitt vor der Talenge unterhalb von 3200 m. Zugleich wurde bei fast allen Morgenfahrten in der Trockenzeit die tägliche Frostgrenze, die meist zwischen 3600 m und 4100 m angetroffen wurde, durchfahren.

Die Inversion ist häufig mit dem Auftreten einer unterschiedlich dichten Nebelbank verbunden. Sie löst sich meist eine Stunde nach Sonnenaufgang auf. Gleichwohl bleibt die Temperatur- und Feuchtigkeitsinversion fast den ganzen Tag über meßbar. Sie scheint in den Stunden vor und nach dem täglichen Zenitstand der Sonne allerdings nur minimal ausgeprägt.

Als Repräsentant eines normalen Strahlungstages mit schwach ausgebildeter Inversion kann die Meßfahrt am 13. 8. 1981 angesehen werden (Abb. 6a). Die kontinuierliche Temperaturabnahme mit der Höhe zeigte bei einem durchschnittlichen Gradienten von $-0,85\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ lediglich zwischen 3750 m und 3900 m eine schwache Temperaturinversion an. Die Bodenfrosthöhe lag bei exakt 4100 m. Der Sonnenaufgang hatte die Temperaturreduktion mit der

Höhe noch nicht entscheidend beeinflusst. Im Gegenteil, die Temperatur nahm oberhalb der Bodenfrostgrenze noch etwas stärker ab als im sonstigen Verlauf der Kurve. Sie zeigte damit dort einen stärkeren negativen Abnahmegradients als in den unteren und mittleren Lagen. Die ausgeprägte Temperaturreduktion hängt damit zusammen, daß unterhalb von etwa 4000 m Höhe die Luft feuchter gewesen ist als oberhalb.

Abweichungen der Temperaturkurve (Abb. 6a) von der berechneten Regressionsgeraden hängen zum großen Teil mit lokalen Temperaturphänomenen zusammen. Sie resultieren aus kleinräumiger Mischung kälterer und wärmerer Luft in der Meßhöhe von ca. 1,5 m oberhalb der Erdoberfläche bei Fahrtrichtungsänderungen in Kurven oder an der Einmündung von kleinen Seitentälern bzw. auf Rücken und in Senken.

In dem Temperaturhöhenprofil vom 7. 8. 1981 (Abb. 6b) war zwischen 3600 m und 3850 m Höhe eine Nebeldecke ausgebildet. Unmittelbar oberhalb der Nebeldecke zwischen 3850 m und ca. 3950 m trat eine markante Temperaturumkehr ein, bei der die Temperatur auf 100 m um fast 3 °C anstieg. Unterhalb der Nebeluntergrenze zwischen 3300 m und 3600 m NN nahm die Temperatur mit einem Höhengradienten von $-1,11\text{ °C}/100\text{ m}$ rasch ab. Ähnlich hohe Abnahmebeträge zeitigte der Gradient mit $-1,02\text{ °C}$ oberhalb der Inversionsschicht zwischen 3900 m und 4660 m.

Bei Meßfahrten von Charazani zur Talenge am Ostrand des Untersuchungsgebietes war an vielen Strahlungstagen das Kaltluftphänomen in der engeren Talschlucht des Rio Charazani ausgebildet. Häufig nahmen die Temperaturen bereits unmittelbar unterhalb des Ortes Charazani hangabwärts gleichmäßig ab und zeigten damit einen Kaltluftsee von 500 m Dicke an, wie z. B. bei der Meßfahrt am 3. 8. 1981 (Abb. 6c). In anderen Fällen beschränkte sich der Kältesee auf die unteren 200 m, wie bei der Meßfahrt am 4. 8. (Abb. 6d). Natürlich tritt in diesem Talbereich nicht an allen Tagen des Jahres ein Kaltluftstau auf. Feuchte Wetterlagen während der Regenzeit bilden fast immer Ausnahmen. Dies zeigen die Meßfahrten am 5. 8. 1981 (Abb. 6e), am 28. 8. 1981 (Abb. 6f) und am 22. 3. 1981 (Abb. 6g) deutlich an. Das Kaltluftphänomen war an diesen Regentagen nicht ausgebildet. Am 28. 8. 1981 (Abb. 6f) zeigten sich nur noch an den Einmündungen von Seitentälern Kaltluftphänomene. Am 22. 3. 1981 (Abb. 6g) belief sich der Gradient auf $-0,8\text{ °C}/100\text{ m}$; am 28. 8. 1981 (Abb. 6f) und am 5. 8. 1981 (Abb. 6e) waren die Temperaturgradienten hingegen mit $-0,34\text{ °C}$ und $-0,47\text{ °C}/100\text{ m}$ erheblich geringer.

Verallgemeinert man die Ergebnisse aller Meßfahrten (einschließlich der hier nicht aufgeführten), so wird deutlich, daß in diesem randtropischen Höhenal in der Trockenzeit fast täglich und in der Regenzeit häufig – mit Ausnahme der wirklichen Regentage – morgens Inversion am Boden mit Kaltluftseenbildung im unteren Talbereich und eine weitere Umkehrschicht der Temperatur und der relativen Feuchte in Höhen zwischen 3400 m und 4100 m ausgebildet sind (Photos 1, 3 u. 4). Die Kaltluftseenbildung wird durch nächtliche katabatische Bergwinde verursacht. Auslösender Faktor der Temperatur- und Feuchtigkeitsumkehr zwischen

3400 m und 4100 m ist das stereotype Kondensationsniveau dieses Höhenbereichs, das dem tropischen Tageszeitenklima mit weitgehend feststehenden Feuchtigkeitsniveaus und täglichem Talwindphänomen voll entspricht. Nur ausgesprochen regenbürtige Wetterlagen durchbrechen dieses Schema (vgl. LAUER 1975).

Das thermische Geländeklima im Bereich der Charazani-Talung³⁾

Im folgenden soll vor allem der raum-zeitliche Wandel der thermischen Struktur im Untersuchungsgebiet dargelegt werden. Er prägt Vegetation und Landnutzung im besonderen Maße. Im Raum ist vor allem der vertikale Wandel ausschlaggebend, während in der Zeit der Wandel der Wärmeverhältnisse zwischen der sommerlichen Regen- und der winterlichen Trockenperiode prägend wirkt.

Der nordostbolivianische Untersuchungsraum liegt in den äußeren, südhemisphärischen Tropen in Höhen zumeist oberhalb der Waldgrenze. Er wird vom jährlichen Sonnengang maßgeblich beeinflusst. Dieser gestaltet dort das Geländeklima anders als in mittleren Breiten.

In der winterlichen Trockenzeit werden nordexponierte Hänge stark bestrahlt. In der sommerlichen Regenzeit steht die Sonne zweimal senkrecht über dieser Region – am 3. November und am 8. Februar –, so daß 97 Tage lang die südexponierten Hänge einen gewissen, wenn auch schwachen Strahlungsvorteil genießen. Die starke Reliefenergie des Raumes bedingt charakteristische Horizontneigungsphänomene und einen markanten Höhenwandel der strahlungsabhängigen thermischen Gegebenheiten. Beide werden mithin bei ausgeprägten Regen- und Trockenzeiten durch den Bewölkungsgang stark beeinflusst. Vegetation und Landnutzung sind an diesen randtropischen thermischen und hygri-schen Haushalt angepaßt.

Die Einstrahlungs- und Besonnungsverhältnisse

Detaillierte Studien zum Gelände- und Bodenklima konnten (vgl. Abb. 1) zwischen 2700 m und 4660 m NN im Bereich der Charazani-Talung von den Quellflüssen bis zur Einmündung des Rio Amarete durchgeführt werden.

Der Charazani-Fluß fließt innerhalb des Untersuchungsgebietes von West nach Ost. Sein Tal hat eine steile, südexponierte und eine flacher geneigte, nordexponierte Flanke. Eine gewisse Asymmetrie der Anbauzonen an beiden Talhängen wird nicht nur von deren unterschiedlicher Erwärmung hervorgerufen, sondern ist auch topographisch bedingt. Die südexponierten Talflanken weisen in der Regel

³⁾ Für Mithilfe bei der Datenerhebung im Gelände danke ich den Mitarbeitern: Dipl.-Agr. B. SCHNABL, cand. geogr. D. ANHUF, cand. geogr. W. ERLNACH und cand. geogr. P. FRANKEN; für die Datenbearbeitung: Dr. P. FRANKENBERG, Dipl.-Geogr. M. D. RAFIQPOOR und cand. geogr. W. ERLNACH.



Photo 1: Morgendliche Nebel in der Charazani-Talung. Blick nach Osten, talabwärts von Charazani (3300 m NN)
Morning haze in the Charazani-Valley. Eastward view down the valley from Charazani (3300 m a.s.l.)

Photo 2: Die Charazani-Talung in 2800 m NN. Blick talab nach Osten; rechts: nach Norden exponierter Hang unterhalb von Sacanagon mit Terrassenkulturen; links: südlich exponierter Hang unterhalb Chullina
The Charazani-Valley at 2800 m a.s.l.. Eastward view down the valley. To the right: slope exposed to the North below Sacanagon with terrace-cultivation. To the left: slope exposed to the South below Chullina

Photo 3: Die Charazani-Talung (Standort 3000 m NN). Blick talauf nach Westen; links: strahlungsbegünstigte Anbauhänge nördlich exponiert; in der Talung bewässerte Mais- und Weizenfelder; an den Hängen Reste der Nebel im Bereich der Temperatur/Feuchtigkeitsinversion in den Talschlüssen (3400 m bis 3900 m)
The Charazani-Valley from 3000 m a.s.l.. Westward view up the valley. To the left: cultivated slopes favoured by radiation and exposed to the North. In the valley irrigated fields with maize and wheat. Slopes covered with remainders of haze in the zone of the temperature/humidity inversion at the origins of the valleys (3400 to 3900 m a.s.l.)

Photo 4: Strahlungsbegünstigter Hang bei Sacanagon; im Vordergrund Windschur an Eukalyptus-Bäumen durch Talwind
Slope favoured by insolation near Sacanagon. In the foreground eucalyptus-trees shorn by the valley-wind

Neigungswinkel von 30–45°, die nordgerichteten Talflanken aber mittlere Neigungen zwischen 15° und 35° auf (Photo 2 u. 3).

Die Talflanken im östlichen Bereich des Arbeitsgebietes bei Chullina und Sacanagon (vgl. Abb. 1) dienten als exemplarischer Untersuchungsraum. In diesem Bereich wurde die Abhängigkeit der Wärmeparameter von der Exposition, der

Neigung und der Höhe als geländeklimatisches Beispiel der südhemisphärischen Randtropen näher untersucht.

Die Strahlungs- und Besonnungsverhältnisse stellen die Grundlage der thermischen Gegebenheiten und Vorgänge im Arbeitsgebiet dar. Im Hauptort Charazani wurde die Globalstrahlung in 3300 m Höhe mit Hilfe eines Robitzsch-Strahlungsschreibers registriert. Der zwischen

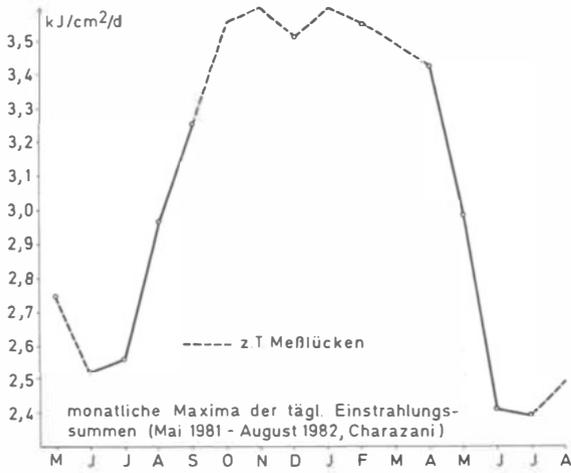
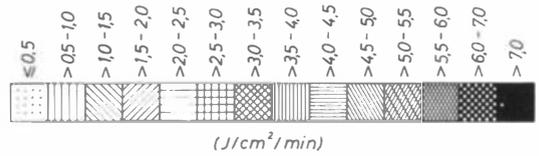
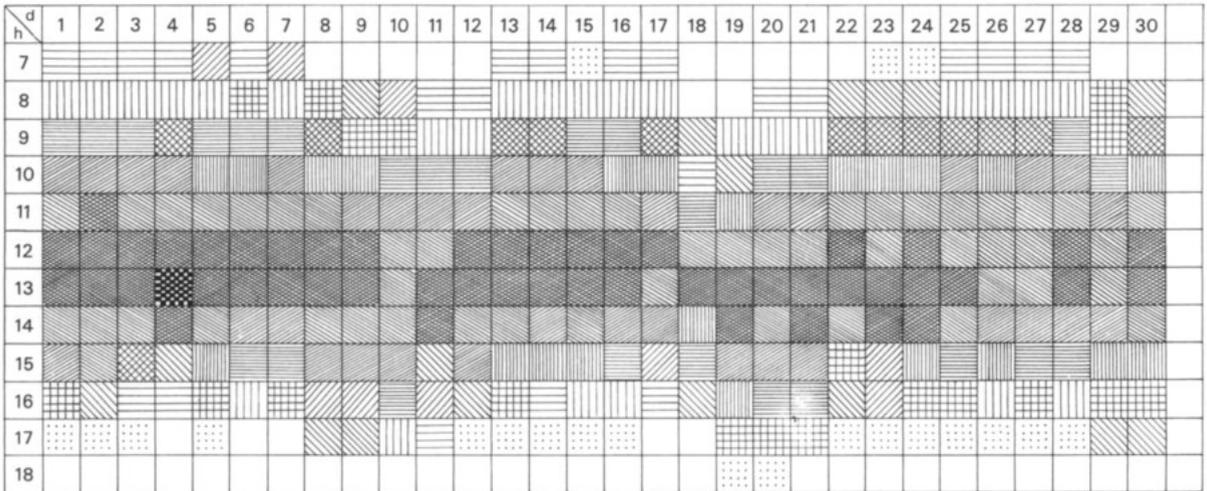


Abb. 7: Strahlungsverhältnisse in Charazani
Global radiation in Charazani



Juni 1981 (in J/cm²Min.)



Dezember 1981 (in J/cm²Min.)

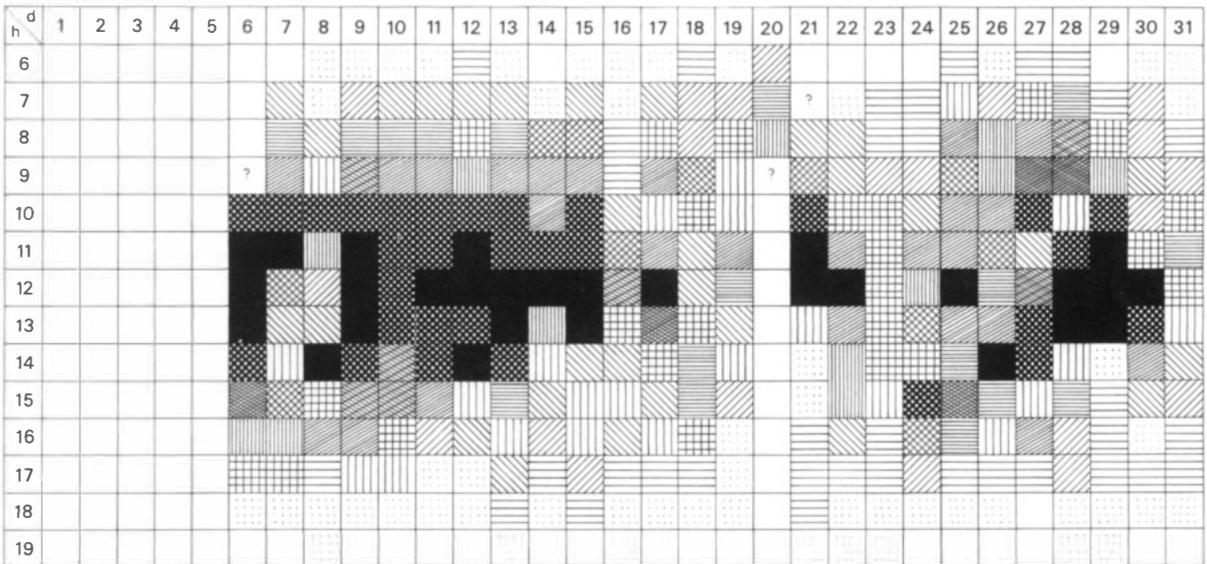


Tabelle 2: Vergleich gemessener Strahlungs-Maximalwerte (Strahlungsmesser in Charazani) mit der berechneten potentiellen Einstrahlung (n. GESSLER)

Relation of measured maxima of irradiation to calculated potential insolation

Monat	maximale monatliche Einstrahlungssumme	Quartalsumme der Einstrahlung	Jahreszeitensumme der potentiellen Einstrahlung (n. GESSLER)	Differenz (3)-(4) in % zu (4)
(1)	in kJ/cm ² / m (2)	in kJ/cm ² / q (3)	in kJ/cm ² / q (4)	(5)
Juni 1981	75,780	} 247,179	213,992	15,5
Juli	79,422			
August	91,977			
September	97,650	} 303,940	268,294	13,3
Oktober ¹⁾	103,540			
November ¹⁾	102,750			
Dezember	108,810	} 317,727	296,049	7,3
Januar 1982 ¹⁾	109,461			
Februar	99,456			
März ²⁾	108,159	} 303,381	268,294	13,1
April	102,780			
Mai	92,442			
Jahressumme		1172,227	1046,629	
	Differenz			12,0

¹⁾ Für Oktober und November 1981 lagen keine Messungen vor, daher wurden aus den Nachbarmonaten September und Dezember Durchschnittswerte ermittelt, ebenso für Januar 1982 aus Dezember 1981 und Februar 1982.

²⁾ Im März 1982 lagen nur für 13 Tage Meßwerte vor. Das in dieser Spanne gemessene Maximum (3,186 kJ/cm² / d) wurde mit Hilfe des Mittels aus den Nachbarmonaten Februar und April 1982 nach oben korrigiert.

Mai 1981 und August 1982 beobachtete Strahlungsgang ist aus Abb. 7a zu ersehen. Daraus folgt, daß die Strahlungskurve ein deutliches Winter-(Trockenzeit-)Minimum und ein ebenso deutliches Sommer-(Regenzeit-)Maximum zeitigt. Damit ist die klare Abhängigkeit des Strahlungsganges vom scheinbaren Gang der Sonne erwiesen. Lediglich in der vollen Regenzeit, im Dezember, kann ein Rückgang des Strahlungsgenusses auch durch starke Bewölkung bedingt sein (Meßlücken sind durch Strichelung der Kurve gekennzeichnet).

Ein exemplarischer Vergleich der Tagesgänge der Globalstrahlung während eines Regenzeit- und eines Trockenzeit-Monats gibt zu erkennen, daß der Regenzeit trotz der starken Bewölkung höhere kurzzeitige Strahlungswerte eignen als der fast wolkenlosen Trockenzeit, da die Regenperiode mit dem Höchststand der Sonne in den solarklimatischen Sommer fällt (Abb. 7b-c). Während jedoch in der winterlichen, oft sehr diesigen Trockenzeit die Tagesgänge sehr regelmäßig ausgebildet sind, zeigen sie während der durch einen häufigen Wechsel von klaren und bedeckten Wetterlagen gekennzeichneten sommerlichen Regenzeit Unregelmäßigkeiten.

In einer Tabelle (Tab. 2) sind einige markante, aus den ermittelten Tagessummen abgeleitete maximale monatliche Strahlungssummen aufgeführt. Die Zahlen zeigen ebenfalls den klaren Jahresgang. Die Werte wurden für Quartale mit den aus den jahreszeitlichen Bestrahlungsstärken nach der

Methode von GESSLER (1925) errechneten potentiellen Einstrahlungssummen verglichen. Daraus geht hervor, daß die gemessenen Strahlungssummen sogar etwas höher sind als die berechneten. Dies liegt daran, daß das Strahlungsgerät zu jeder Tageszeit wegen der halbkugelförmigen Meßanlage die einfallende Strahlung senkrecht (also maximal) mißt, während die Ableitung über die potentielle Besonnung von einer ebenen Normalfläche ausgeht.

Für das Arbeitsgebiet wurde eine Karte der theoretischen Besonnung entworfen (Abb. 8). Sie basiert ebenfalls auf Berechnungsverfahren von GESSLER (1925). In der Kartendarstellung sind Beeinträchtigungen durch die Bergüberschattung allerdings nicht berücksichtigt, so daß die Karte an einigen Hangpartien infolge der vereinfachten Berechnung mehr potentielle Strahlung zugewiesen bekam als aktuell möglich ist.

Das Maximum an potentieller Einstrahlung zeigten die etwa 15° geneigten, nordexponierten Hänge mit 1078 kJ/cm²/a. Die größte einheitliche Fläche mit einer potentiellen Einstrahlung von über 250 kcal/cm²/a (= 1047,5 kJ) liegt östlich des Ortes Kaata und zieht sich von dort hinunter zum Rio Calaya. Insgesamt ist der Kaata-Hang, der sich bis in 4000 m Höhe erstreckt, ein strahlungsthermisch homogener und hochbegünstigter Hang. Bevorzugt ist auch die weitgehend nördlich exponierte Hangpartie, die sich von Chajaya und Charazani bis zum Ostende des Arbeitsgebietes hinzieht. Lediglich die markanten Erosionsrinnen und heraus-



Entwurf: W. Erlenbach

Abb. 8: Theoretische Besonnung (berechnet nach GESSLER 1925; Ausschnitt s. Abb. 1)

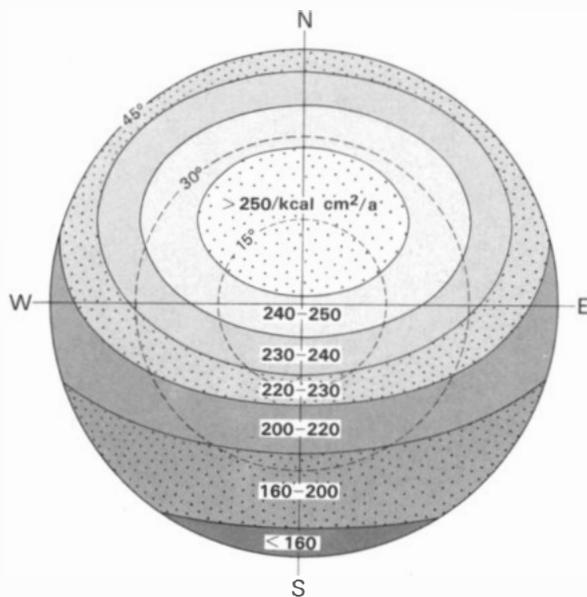
Theoretical insolation (after GESSLER 1925; for the area see Fig. 1)

(Legende: Figur S. 235)

ragende Felspartien differenzieren die einheitliche Exposition im stärkeren Maße. Bis in Höhen von 4100 m bis 4300 m werden die Hänge ackerbaulich genutzt. Die meist steilen südlich oder südwestlich exponierten, weniger besonnten Gegenhänge sind von der Strahlung benachteiligt. Im gegebenen Beispiel ist es insbesondere der Hang von Chullina, der sich nach Westen bis in die Gegend nördlich gegenüber von Kaata hinzieht. Er erhält Strahlungsmengen unter 900, teilweise unter 700 kJ/cm²/a. Diese Hänge sind durch einen geringen Anteil an Anbauflächen gekennzeichnet, die sich zu-

dem weniger hoch hinaufziehen. Meist wurden nur dort Terrassenkulturen angelegt, wo das Gelände eben ist oder der Hang kleine Teilstücke in Nordexposition ausweist.

Eine Bestätigung dieser Einstrahlungsberechnungen ergaben Messungen der Oberflächenstrahlungstemperatur, die mit Hilfe einer Infrarotsonde durchgeführt wurden. Die unterschiedlich exponierten Hänge wurden von einem Meßpunkt auf einem Bergsporn in 3000 m NN, von dem aus fast alle Hangexpositionen der unteren Charanzani-Talung erfaßt werden konnten, stündlich mit der Infrarotsonde ab-



Jahressumme der maximal möglichen Einstrahlungsmenge (in $\text{kcal/cm}^2/\text{a}$) für 15° s. Br., dargestellt für eine Idealkuppe (Transmissionsfaktor: 0,8)

Legende zu Abb. 8

getastet. Freilich muß man sich darüber im klaren sein, daß die Meßsonde beim Abtasten von Hängen in einigen hundert Metern Entfernung nur ein „Temperaturintegral“ verschieden großer Ausschnitte und unterschiedlicher Bedeckungsgrade liefert und sogar Einflüsse, die von der durchmessenen Atmosphäre herrühren, integriert. Es kam aber lediglich darauf an, relative thermische Unterschiede momentan gegebener Verhältnisse räumlich differenziert zu erfassen. Einzelmessungen an bestimmten Geländeobjekten werden an anderer Stelle veröffentlicht⁴⁾.

Die Abb. 9b zeigt die Oberflächenstrahlungstemperaturen von unterschiedlich bestrahlten Hangpartien im August (Winter) und März (Spätsommer) zu verschiedenen Tageszeiten. Das Abtasten der Hänge erfolgte in drei Höhenstufen, bei dem der untere Bereich zwischen 2700 m und 3000 m, der mittlere Bereich zwischen 3000 m und 3500 m und der obere über 3500 m NN gelegen war. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Tagesgang der Bodenoberflächenstrahlungstemperaturen (Abb. 9b) für die beiden Jahreszeiten.

Die kartographische Darstellung der Strahlungstemperaturen (Abb. 9a) zeigt bei der ersten Messung am 4. 8. 1981 (Trockenzeit, Strahlungstag) um 9.50 Uhr, daß der Kaltluftsee, der noch gegen 7.30 Uhr durch eine Meßfahrt im Talbereich auf einer Höhe zwischen 3000 m und 2790 m Höhe nachgewiesen werden konnte (siehe Meßfahrten), an der Bo-

denoberfläche nicht mehr ausgebildet war. Im Gegenteil, das Temperaturintegral über den mittleren Hang bei Sacanagon bis in eine Höhe von 3050 m (vgl. Abb. 8) erreichte bereits Temperaturen von 27°C . Der südexponierte Schatthang unterhalb von Chullina wies in einer Höhe von 2700 m bis 3300 m Temperaturen von weniger als 10°C auf, doch erwärmten sich sonnenbeschienene Teile der süd-südwest-exponierten Hänge durchaus schon auf $18\text{--}20^\circ\text{C}$. Der von der Morgensonne beschienene Hang bei Sacanagon ließ eine deutliche Höhengliederung seiner Oberflächentemperatur erkennen. In einer Höhe von 3050 m waren 27°C und in 3400 m Höhe 20°C zu registrieren.

Um 13.00 Uhr war ein Ausgreifen des Temperaturmaximums auf höhere Teile des Nordosthanges sowie auf den reinen Nordhang bis in 3200 m Höhe zu verzeichnen. Die Zunahme des Temperaturmaximums gegenüber der Morgenmessung erwies sich mit $2\text{--}3^\circ\text{C}$ als sehr gering. Auf dem zuvor noch überschatteten Südhang nahm dagegen die Temperatur zwischen 2800 m und 3000 m Höhe um 6°C auf lediglich ca. 14°C bis 16°C zu, bei 3300 m noch um 2° bis 3°C auf 12° bis 14°C . Dies zeigt, daß die Temperaturzunahme auf nahezu allen besonnten Hängen zwischen der 10 Uhr- und der 13 Uhr-Messung im Bereich von etwa 2° bis 3°C liegt, mit Ausnahme des vorher überschatteten Südhanges, der durch die Entschattung eine höhere Temperaturzunahme anzeigt.

Bei Westwärtswanderung der Sonne gehen bis 16.30 Uhr auf den vorher meistbegünstigten Nordhängen die Temperaturen in allen Höhen um ca. 10°C zurück, bleiben aber in vergleichbaren Höhen immer noch höher als auf den Süd- bzw. Südwesthängen, wo die Oberflächentemperaturen gegenüber der 13 Uhr-Messung nur um ca. 2°C gefallen sind. Der Bereich maximaler Temperaturen schrumpft auf dem Nordosthang stärker als auf dem Nordwesthang, was nach dem Sonnengang erklärbar ist.

Bei einer Märzmessung (29. 3.), also noch in der spätsommerlichen Regenperiode, fällt die Trübung der Atmosphäre durch Wasserdampf und Bewölkung stark ins Gewicht. Infolgedessen steigen die Temperaturen zur Mittagszeit (13.00 Uhr) an expositionsbegünstigten Hängen nur auf ca. 20° bis 22°C an. Wegen des höheren Sonnenstandes sind die Gegensätze zwischen nord- und südexponierten Hängen mit nur 2°C dann wesentlich geringer. Das Temperaturmaximum verlagert sich allerdings weiter in den unteren Talbereich, wo die Temperaturen auf 22° bis 24°C ansteigen. In größeren Höhen bei 3500 m gehen sie auf 16° bis 18°C zurück.

Gegen 16.00 Uhr prägt das typische Bild des regenzeitlichen Wolkenaufzugs die Temperaturverhältnisse der Hänge. Der südexponierte Hang kühlt sich infolge der Bewölkung und des niedrigen Sonnenstandes um 4° bis 6°C auf Temperaturen unter 12°C ab. Auch der unter Wolken liegende nordexponierte Hang oberhalb von Sacanagon (oberhalb 3400 m) erfährt eine Abkühlung um ca. 6°C . Nur dort, wo die Einstrahlung noch auf direktem Wege nordwest- und nordexponierte Hänge zwischen dem Talbereich und Sacanagon bescheint, ist es bis in 3000 m Höhe noch 16° bis 18°C warm. Es zeigt sich in der Raumstruktur das gleiche Bild wie am 4. 8. 1981, d. h. wie an einem Strahlungstag.

⁴⁾ Zur Arbeitsweise der Sonde KT 13 vgl. A. KESSLER (1971).

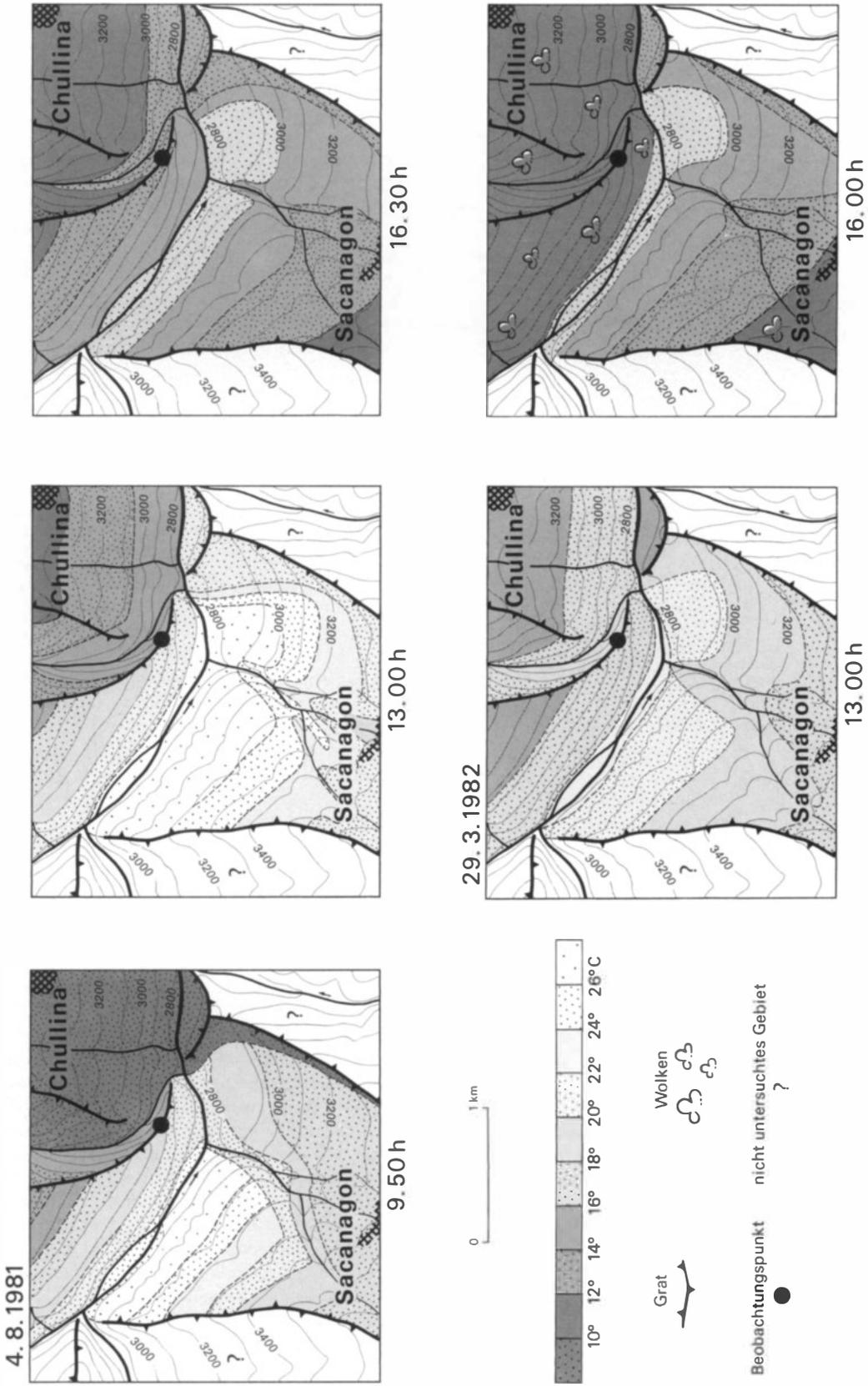


Abb. 9a: Oberflächenstrahlungstemperaturen
Surface radiation temperatures

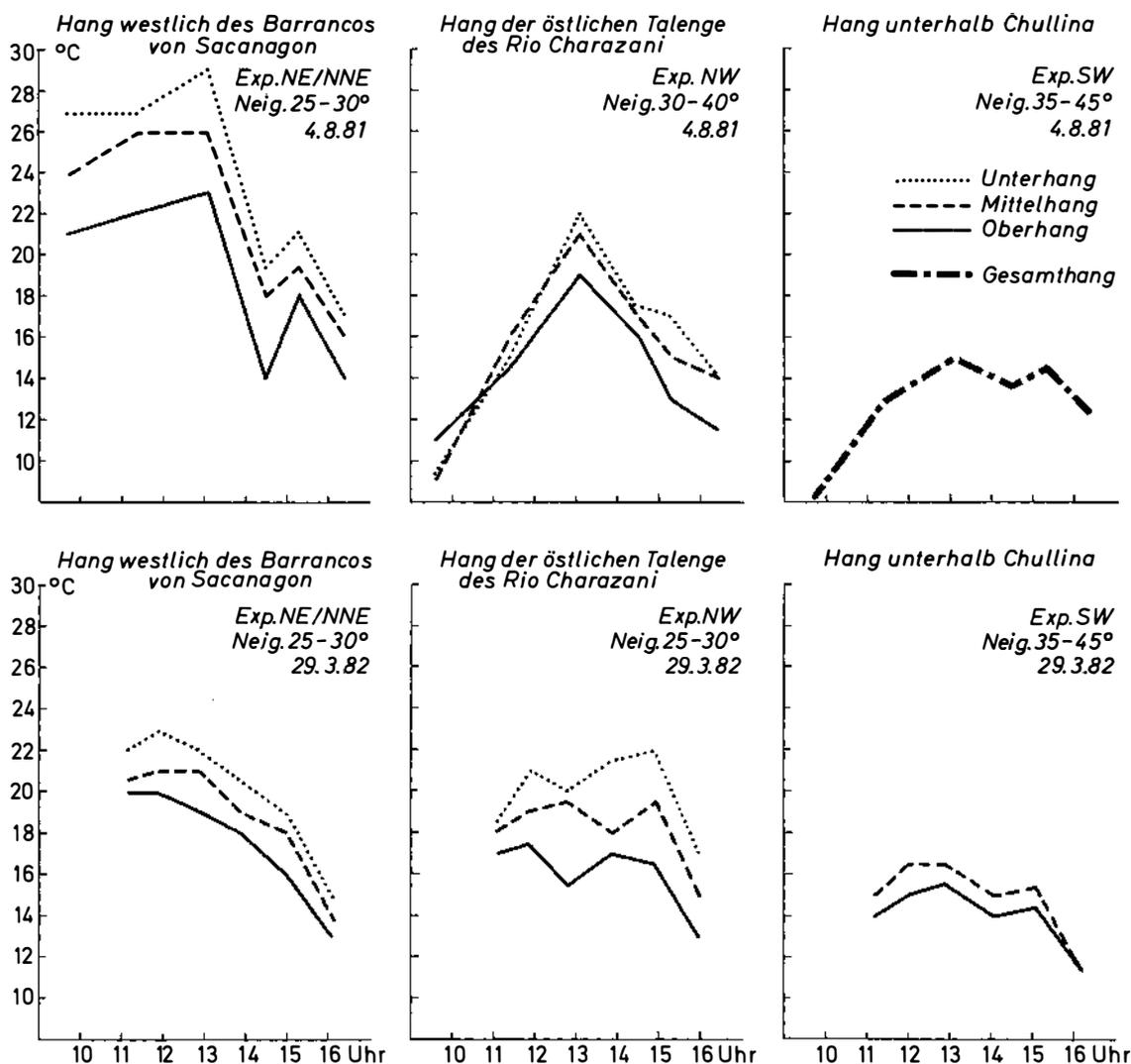


Abb. 9b: Tagesgänge der Oberflächenstrahlungstemperatur
Daily marches of the surface radiation temperatures

Interessant ist, daß die südexponierten Hänge trotz relativ senkrechtem Stand der Sonne im März durch Überschattung infolge stärkerer, von Luveffekten bewirkter Bewölkung und infolge der Steilheit des Reliefs weiter thermisch benachteiligt bleiben.

Die Kurven des Tagesganges der Bodenoberflächentemperaturen (Abb. 9b) zeigen bemerkenswerte Asymmetrien. Der nordost- bis nordnordostexponierte Hang zeitigt sein Temperaturmaximum zur Zeit der 13 Uhr-Messung. Die Gesamtkurve weist jedoch für alle gemessenen Höhenstufen eine deutliche thermische Überbetonung des Vormittags nach. Der rasche Abfall der Nachmittagstemperaturen ist nicht nur auf die einsetzende Bewölkung zurückzuführen,

sondern ist vor allem expositionsbedingt. Die Temperaturkurve des nordwestexponierten Hanges zeigt einen nahezu symmetrischen Tagesverlauf, da die Nachmittagssonne die mangelnde Erwärmung kompensiert.

Eine im Vergleich zum NE-NNE-Hang umgekehrte Asymmetrie ist den Kurven des Hanges unterhalb von Chullina eigen (südwestexponiert). Dieser Hang ist vor dem Mittagmaximum (13.00) wesentlich kälter. Danach kühlt er aber auch nur sehr langsam aus und ist um 16.30 Uhr noch genauso warm wie morgens um 11.30 Uhr, und dies trotz oder gerade wegen einer zunehmenden nachmittäglichen Bewölkung, die sich regelmäßig einstellt. Hänge mit Südwestexpositionen verzeichnen häufig ein spätes thermisches

Maximum, das zum Teil erst nachmittags um 15 Uhr eintritt.

Die oberen Hangteile aller Expositionen besitzen im allgemeinen ein weit vorgezogenes Temperaturmaximum, das häufig bereits vor 12 Uhr erreicht wird.

Es läßt sich feststellen, daß die Bodenoberflächentemperaturen an winterlichen Strahlungstagen ganz erheblich über die normalen Hüttenmaxima der Temperatur ansteigen können. IR-Sonden-Messungen an einzelnen Objekten, über die bei späterer Gelegenheit berichtet wird, erbrachten – je nach Substrat und Exposition – kleinräumig Werte, die zwischen 2700 m und 4100 m Höhe durchaus noch 50° bis 60°C betragen können. Dagegen zeigen über größere Hangpartien gemessene Werte, wie sie mit der Infrarotsonde aus einer Entfernung von mehreren hundert Metern ermittelt wurden, Beträge, die zwar deutlich, doch im ganzen mäßig von den Wetterhüttentemperaturen abweichen und als ein Integral von Einzelmessungen angesehen werden können.

Ganzjährig thermisch begünstigt sind Nordhänge. Davon weichen Südexpositionen im Winter deutlicher negativ ab als im Sommer bei senkrecht stehender Sonne. Die Messungen lassen erkennen, daß die südexponierten Hänge im Sommer trotz ihres Expositions Vorteils infolge der Bewölkung, die sich durch Luveffekte stereotyp einstellt, während der Regenzeit allenfalls gleiche Oberflächenstrahlungstemperaturwerte erreichen wie die nordexponierten Hänge. Die thermische Benachteiligung der West- gegenüber der Ostauslagen, die gleichfalls an manchen Stellen zu beobachten ist und für tropische Regionen in der Literatur immer wieder angeführt wird, kann nur für die Bereiche bestätigt werden, in denen am Nachmittag eine stärkere Bewölkung auftritt. Letztlich drücken die gemessenen Bodenoberflächentemperaturen das aus, was auch die berechneten Strahlungswerte anzeigen, nämlich eine Überwärmung der nördlich exponierten Hangpartien, die damit für die natürliche Vegetation wie für den landwirtschaftlichen Anbau begünstigt sind.

Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe als ökologisches Wärmemaß

Da es in dem Arbeitsgebiet der Charazani-Talung kein klimatologisches Netz gibt und aufwendige Apparaturen wegen der fehlenden Infrastruktur nicht eingesetzt werden können, wurde die Bodentemperatur als ökologisches Wärmemaß an möglichst vielen Meßpunkten zu erfassen versucht.

Man kann davon ausgehen, daß in den inneren Tropen die Bodentemperatur, gemessen in 50 cm Tiefe an einem überschatteten Standort auf ebener Fläche, etwa die Jahresmitteltemperatur der Wetterhütte widerspiegelt. Dies beruht auf der Erfahrung, daß unter innertropischen Wärmebedingungen bereits in 40 cm Bodentiefe Isothermie erreicht wird. WALTER und MEDINA hatten bereits 1969 in den venezolanischen Tropen, wo die Jahresschwankung der Temperatur nur ca. 1°C beträgt, an ganzjährig beschatteten Standorten die Mitteltemperatur des Jahres über Bodentemperaturmessungen in 45 cm Tiefe approximiert.

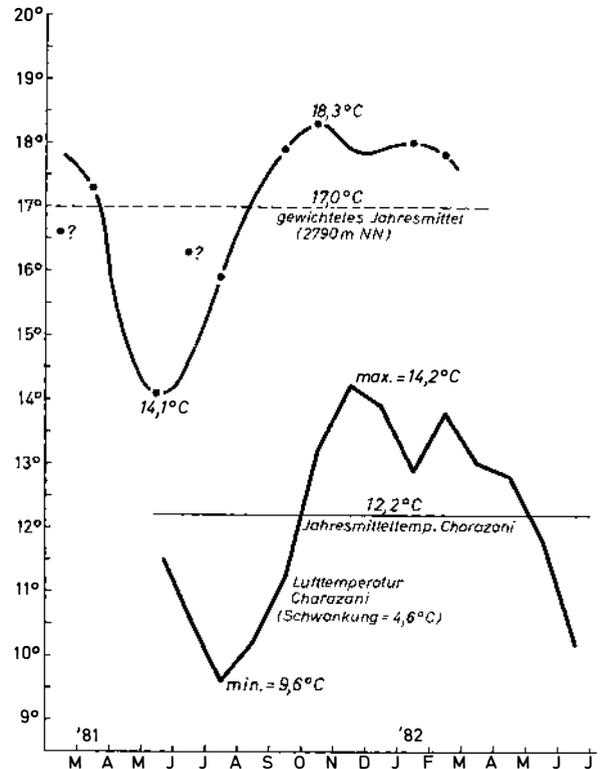


Abb. 10: Jahresgang der 50 cm-Bodentemperaturen auf ebener Fläche in 2790 m Höhe (Talenge)

Annual march of the 50 cm-soil-temperatures on a plane surface at 2790 m a.s.l. (narrow valley)

In den äußeren Tropen des Untersuchungsraumes in Bolivien ist der Jahresgang der Temperatur bereits schwach ausgeprägt (ca. 3° bis 4°C). Wie unsere Messungen ergaben, wird in 50 cm Bodentiefe dieser Jahresgang ohne auffällige Verzögerung nachgezeichnet (Abb. 10). Aber nur die auf ebenen überschatteten Flächen durchgeführten Messungen ergeben Mittelwerte kürzerer Zeiträume (z. B. Monate), die auch mit den Werten der einzelnen monatlichen Mittel, die in der Wetterhütte gemessen werden, annähernd übereinstimmen. Alle Messungen ohne Schattendach an verschiedenen Hangneigungen und topographischen Expositionen sowie bei verschiedenen Vegetationsbedeckungen weichen aufgrund der Stellung zur jeweiligen Sonnenposition positiv oder negativ von der Standardtemperatur auf den beschatteten ebenen Flächen ab.

Es ist daher möglich, mit Hilfe eines größeren Kollektivs von räumlich und zeitlich über die Jahreszeiten gut verteilten Messungen unter Berücksichtigung der genannten topographischen und astronomischen Parameter die mittleren Wärmeverhältnisse eines ausgewählten Untersuchungsraumes geländeklimatisch zu beschreiben.

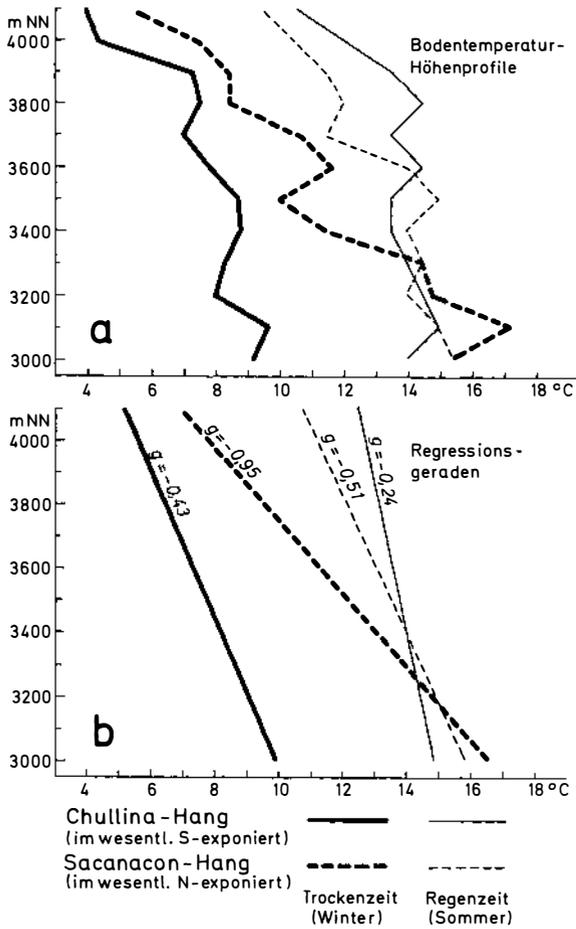


Abb. 11: Bodentemperatur und Höhe unterschiedlich exponierter Hänge
Altitudinal variation of the 50cm-soil-temperatures on differently exposed slopes

Die Temperatur in 50 cm Tiefe repräsentiert überdies die Wärme im unteren Bereich des physiologisch wesentlichen Wurzelapparates. Dort sind die thermischen Verhältnisse entscheidend für das Wasseraufnahmevermögen der Pflanzen und damit auch für ihre Nährstoffversorgung. Damit sind ökologisch relevante Aussagen z. B. über die thermischen Bedingungen von Pflanzen- und Anbaustandorten etc. abzuleiten.

Der 50 cm-Bodentemperaturwert erweist sich zugleich als sehr geeignet für ökoklimatische Untersuchungen in schwierigem Gelände und erlaubt es, zumindest in den Tropen, die Wärmeverhältnisse mit einfachen Mitteln aussagekräftig zu beschreiben (vgl. hierzu WINIGER 1979).

In Abb. 11 a sind die in 50 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen eines südexponierten Hanges (Chullina) mit denen des nordexponierten Hanges (Sacanagon) für die Regen- und Trockenzeit vergleichend nebeneinander gestellt. In der Trockenzeit des Winters fällt die durchgehende

Überwärmung des nordexponierten Sacanagon-Hanges gegenüber dem südexponierten Chullina-Hang auf. Dies beruht auf dem ausgeprägten Nordstand der Sonne während dieser Zeit des Jahres. Die geringe Bewölkung während der Trockenzeit verstärkt diesen Effekt, da sie die Strahlung ziemlich ungehindert einwirken läßt. Dabei weist der untere Nordhang die stärkste Überwärmung auf. Die Temperaturdifferenzen beider Hänge reduzieren sich allerdings mit der Höhe. In der Mitte der Regenzeit, wenn die Sonne zur Mittagszeit nahezu senkrecht über dem Untersuchungsraum steht, sind die Temperaturdifferenzen beider Hänge gering. Oberhalb von 3600 m erscheint dann sogar der sonst benachteiligte Chullina-Hang wärmer, weil dieser südexponierte Bereich für kurze Zeit den höheren Strahlungsgenuß erfährt. Dies betrifft den Zeitraum von November bis Januar, wenn die Sonne mittags im Untersuchungsgebiet von Süden scheint. Insgesamt ist im Jahresmittel der Sacanagon-Hang wärmer als der Chullina-Hang.

Die Regressionsgeraden der Bodentemperaturmessungen zur Höhenlage der Meßpunkte beider Hangprofile unterstreichen die geschilderten Phänomene (Abb. 11b). Der Nordhang weist in der Regen- und in der Trockenzeit höhere thermische Abnahmegradienten auf als der Südhang. In der Regenzeit werden nur geringe Abnahmegradienten der Bodentemperatur verzeichnet. Der Chullina-Hang zeigt dann infolge der sehr geringen Gradienten für obere Hangpartien sogar die höchsten Temperaturwerte.

Das Regressionsdiagramm (Abb. 12b), in dem ohne jahreszeitliche Differenzierung alle in 50 cm Tiefe gemessenen Temperaturen der nördlich und südlich exponierten Hänge, nach Neigung differenziert, sowie horizontaler Flächenstücke des Untersuchungsgebietes eingetragen worden sind, erhärtet den Befund, daß die Südhänge generell kühler sind und in tieferen Tallagen um etwa 4° bis 5°C von nordexponierten Hängen negativ abweichen. Mit der Höhe wird dieses Temperaturdefizit kleiner. In 4000 m beträgt die Differenz im Jahresmittel nur noch etwa 3°C, um auf der Hochfläche bei ca. 4400 m, auf der überdies keine ausgeprägten Hangneigungen mehr vorkommen, unter 2°C abzusinken. Die Regressionsgeraden zeigen weiterhin, daß der Abnahmegradient mit der Höhe an den kühlen Südexpositionen $-0,57\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ beträgt, an den nordexponierten, überwärmten Talflanken jedoch $-0,77\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Greift man nur die auf waagerechten Flächen gemessenen 50 cm-Temperaturen des Erdbodens heraus, so ergibt sich ein Höhengradient von $-0,61\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,901. Die gemessenen Werte weichen nur wenig von der Regressionsgeraden ab. Sie können also weitgehend als mittlerer Gradient der Temperaturabnahme mit der Höhe in der Charazani-Talung angesehen werden (vgl. Tab. 1).

Der Vergleich der Bodentemperaturen mit den Jahresmitteln der Hüttentemperaturen der Stationen Ulla Ulla und Charazani (in Abb. 12b als Tu, Tc eingetragen) zeigt, daß die Hüttentemperaturen annähernd auf der Regressionsgeraden für waagerechte Flächen liegen. Damit wird die 50 cm-Bodentemperatur als geländeklimatische Bezugsgröße bestätigt.

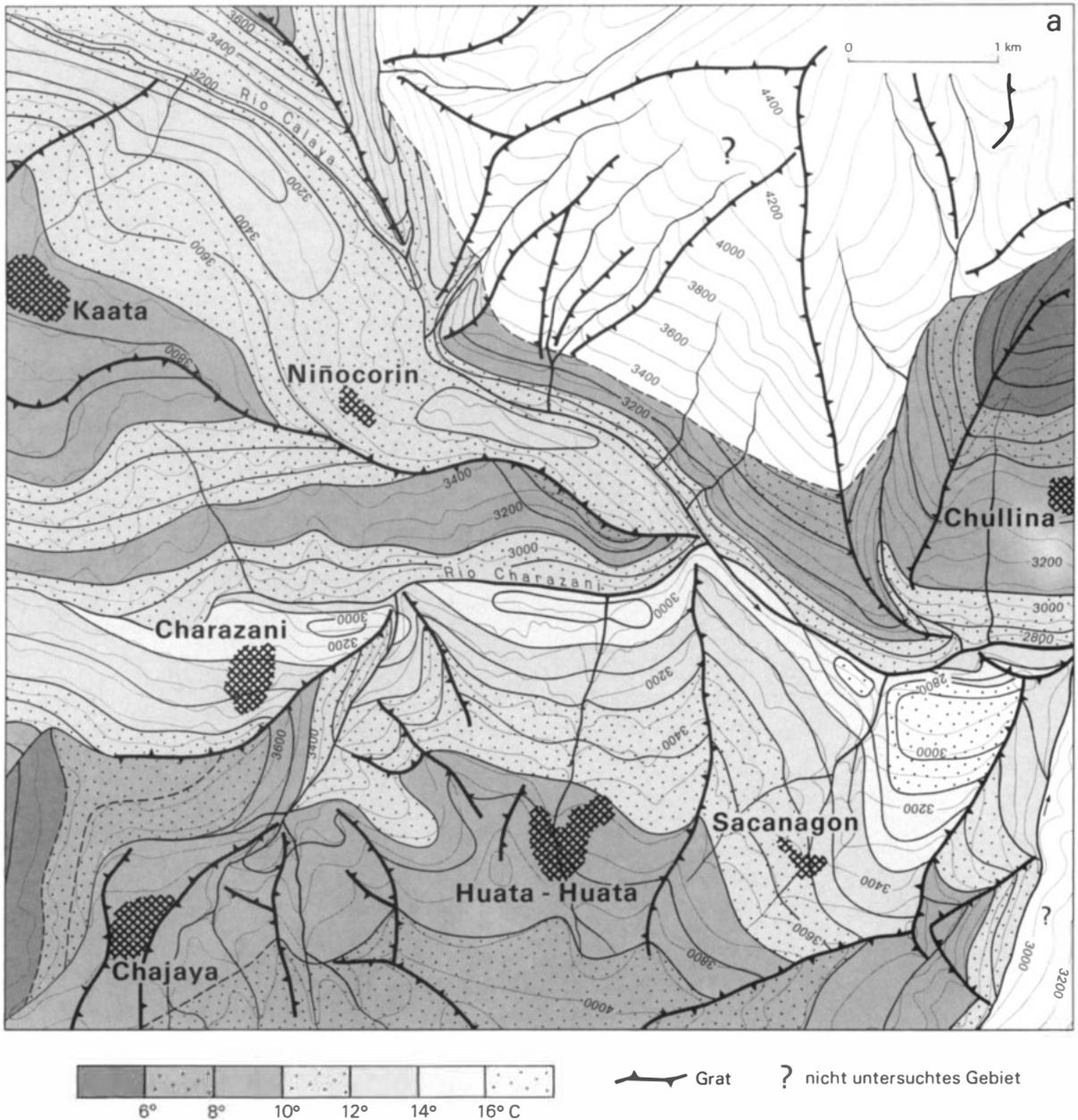


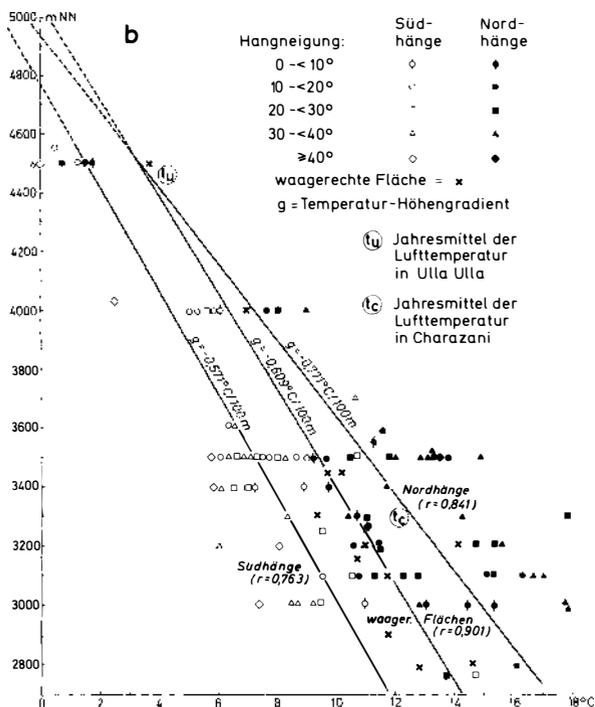
Abb. 12: 50 cm-Bodentemperaturen: Isothermenkarte (a) und Regressionsgeraden (b)
The 50 cm-soil-temperatures: map of isotherms (a) and regression lines (b)

Isothermenkarte der 50 cm-Bodentemperaturen im Charazani-Tal

Um ein räumliches Bild der Bodentemperaturverteilung – gemessen in 50 cm Bodentiefe – zu entwerfen, wurde mit Hilfe der in den Monaten August bis Oktober 1981 aufgenommenen Daten, also für den Übergang zwischen der Trockenzeit (Winter) und der Regenzeit (Sommer), eine Isothermenkarte (Abb. 12a) gezeichnet. In dem detailliert bearbeiteten Teil der Charazani-Talung liegt der wärmste

Bereich an einem Hang nordöstlich von Sacanagon in ca. 2900 m bis 3000 m Höhe, der 20° bis 25° nach Norden geneigt und damit in dieser Jahreszeit optimal besonnt ist. Die mittleren Bodentemperaturen erreichen hier über 18 °C. Die oberhalb anschließenden Hangpartien erweisen in Höhen bis 3200 m bei Nordexpositionen und mittlerer Neigung Werte von mehr als 17 °C.

Nördlich exponierte Hänge in der Nähe der Orte Huata-Huata und Charazani erreichen in mittleren Höhen zwischen 3000 m und 3200 m noch Temperaturen zwischen



15 °C und 16,5 °C. In diesen mittleren Höhenlagen sind die Bodentemperaturwerte zwischen 13° und 14 °C weitflächig verbreitet. Auch die mehr nordostexponierten Hangpartien zwischen 3200 m bis 3300 m Höhe unterhalb von Kaata und bei Niñocorin gehören mit Temperaturen zwischen 12,5° bis 13,5 °C noch zu den für Ackerbau begünstigten Hangpartien.

Die Karte zeigt, daß die tieferliegenden Bereiche der Talung durch die längere Überschattung am Morgen und am Abend sowie infolge von Kaltluftsee-Bildung allgemein kühler sind. Die 50 cm-Bodentemperaturen liegen um 2° bis 4 °C unter den Werten der optimal temperierten mittleren Hangpartien. Die Talböden sind meist noch kälter, weil sich die nächtlichen Kaltluftseen, wie durch Meßfahrten nachgewiesen werden konnte, dort am längsten halten. Besonders markant hebt sich das Gebiet des Kaltluftstaus vor der Engstelle des Charazani-Tals am Ostende des Untersuchungsgebietes mit niedrigen Bodentemperaturwerten heraus (Abb. 12a). Das Kaltluftphänomen läßt sich im Bereich des gesamten Talzuges in Höhen von 2800 m bis maximal 3500 m mit Temperaturen zwischen 9° und 12 °C gut verfolgen.

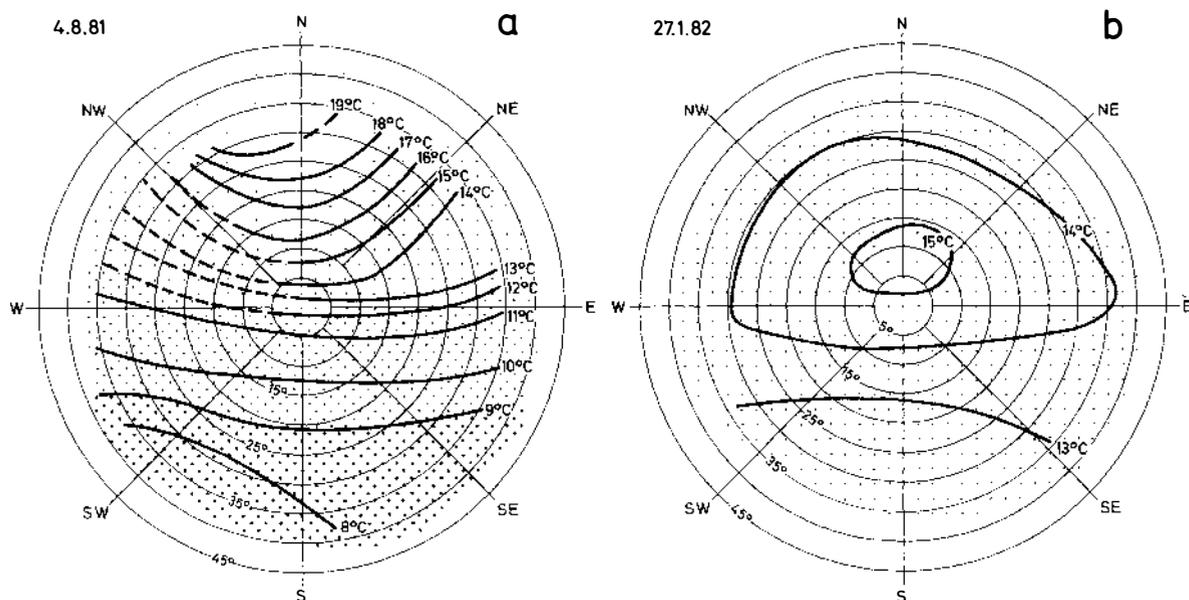


Abb. 13: Abhängigkeit der 50 cm-Bodentemperaturen von Exposition und Hangneigung zu verschiedenen Jahreszeiten (3000 m NN)
The 50 cm-soil-temperatures as a function of exposition and inclination in different seasons (3000 m a.s.l.)

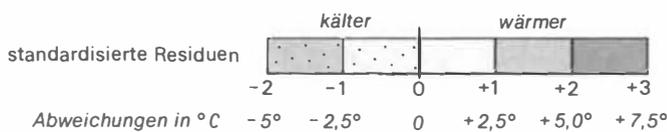
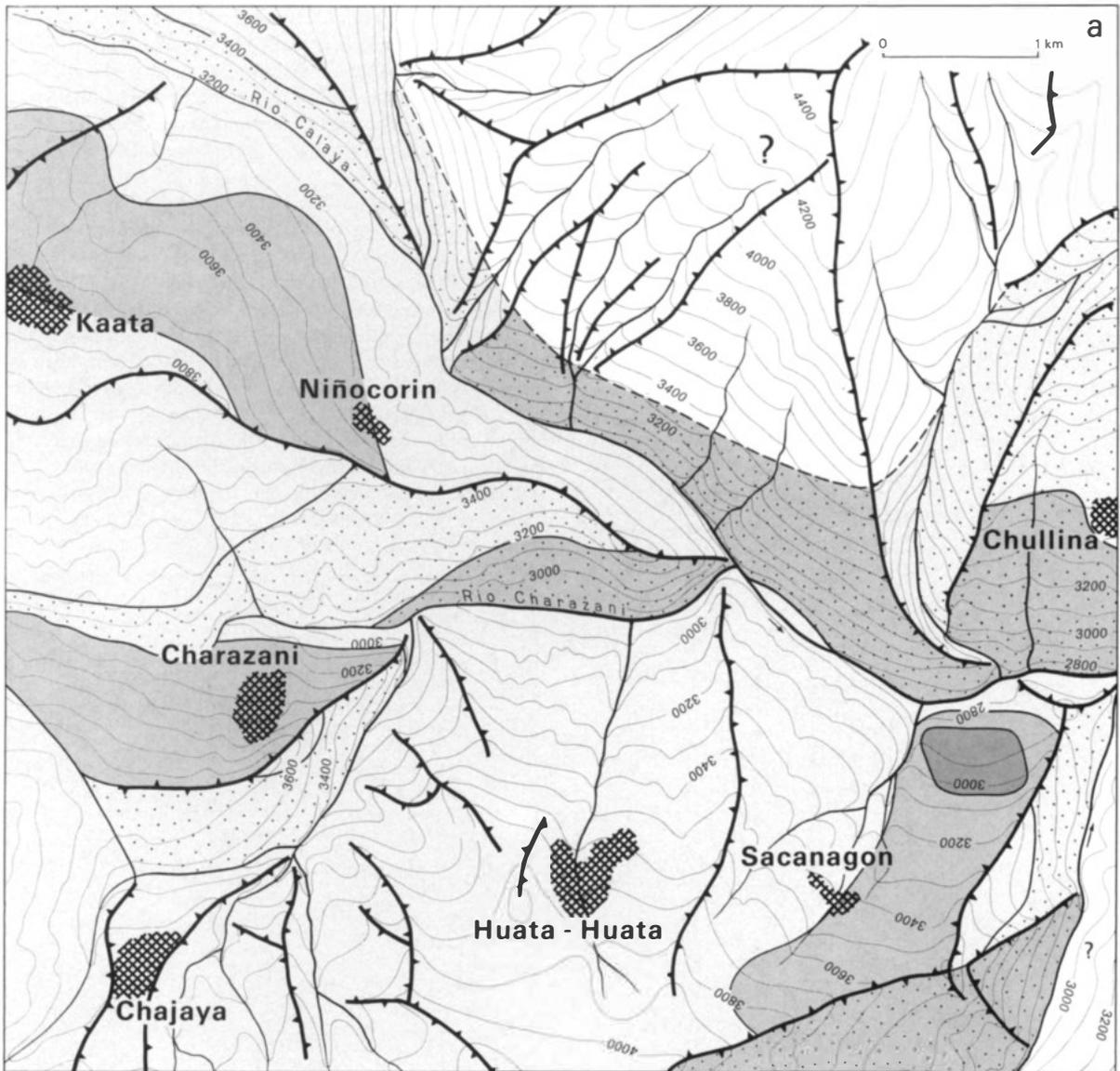
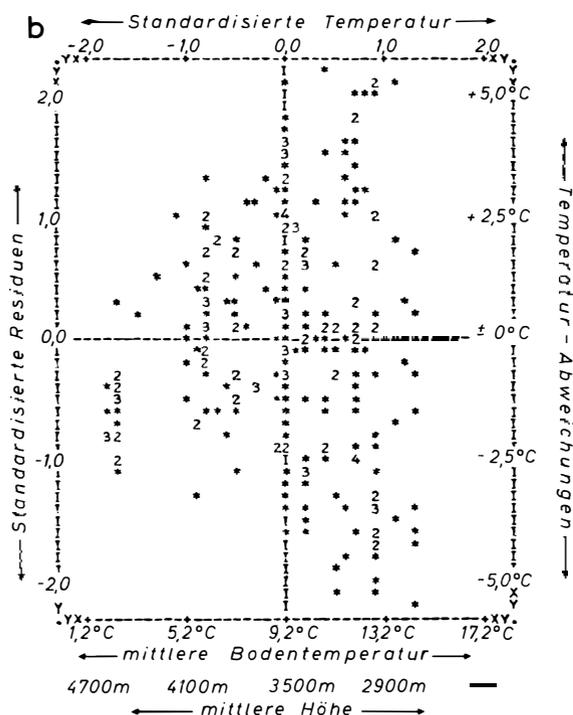


Abb. 14: Residuenkarte (a) und -diagramm (b) der 50 cm-Bodentemperaturen nach dem multiplen Regressionsmodell
Map (a) and diagram (b) of the residuals of the 50 cm-soil-temperatures according to the multiple regression model

Von den mittleren Höhen ausgehend nehmen im Referenzraum die Bodentemperaturen im allgemeinen mit der Höhe ab, so daß die niedrigsten Werte von ca. 4 °C in Höhen zwischen 4000 m und 4500 m an den südexponierten Hangpartien registriert werden.

Die Isolinien der 50 cm-Bodentemperaturen weisen auf allen deutlich ausgeprägten Berggratlinien Unstetigkeitsstellen auf. Der Versetzungsbetrag wird jedoch mit zunehmender Höhe geringer und ist oberhalb von 4200 m kaum noch auszumachen. Auch in den Flußtälern, an denen die Expositi-



tionen der Talflanken abrupt wechseln, treten vor allem dann Kontinuitätssprünge auf, wenn nördlich exponierte in steilere südlich exponierte Hangpartien übergehen.

Die Isothermenkarte der 50 cm-Bodentemperaturen repräsentiert weitgehend die thermischen Bedingungen der ausgehenden Trockenzeit des Winterhalbjahres (Saatzeit), wenn die Sonne nördlich des Untersuchungsraumes im Zenit steht. Gegen den Sommer hin dürften sich die Expositionsdifferenzen verringern, da die Sonne im Früh- und Spätsommer einen Senkrechtstand und im Hochsommer sogar einen leichten Südstand erreicht. Stichprobenmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten haben geringere Expositionsdifferenzen des Isothermenbildes erwiesen.

Um zu testen, wie die Bodentemperaturen der verschiedenen Expositionen auf den Jahrgang der Sonne reagieren, wurden auf einer Plateauekuppe in 3000 m Höhe, die zwischen dem Haupt- und einem Nebenfluß des engeren Arbeitsgebietes liegt (s. Beobachtungspunkt Abb. 9a), 50 cm-Bodentemperaturen in allen Expositionen in den Monaten Januar, März, Mai und August gemessen (Abb. 13). Der Einfluß der scheinbaren Sonnenwanderung auf das thermische Klima dieses randtropischen Raumes wird damit verdeutlicht.

Die nordexponierte Flanke des Plateaus spiegelt die größte Überwärmung während der Trockenzeitmonate wider, da dann über einen sehr langen Zeitraum nordexponierte Hänge stark von der Sonne beschienen werden. Diese thermische Bevorzugung hält bis in das Sommerhalbjahr (Regenzeit) an, wenn die Sonne im Zenit steht oder gar einen leicht-

ten Südbogen beschreibt. Der geringe Südstand der Sonne während der Regenzeit wirkt sich kaum entscheidend auf die Bodentemperaturen aus. An Südhängen kann eine nur kurzfristige thermische Bevorzugung festgestellt werden. Eine stärkere Besonnung des Südhanges hält in der Regenzeit des Sommerhalbjahres nur für wenige Stunden an. Ihre Einwirkung auf die tieferen Bodenhorizonte ist damit gering.

Während der Trockenzeit des Winters sind die Temperaturunterschiede zwischen der nördlichen und der südlichen Seite des Plateaus hingegen extrem ausgeprägt. Am 4. 8. wurden im Jahre 1981 am Nordhang in 50 cm Tiefe Temperaturen von 19 °C gemessen, am südlichen Hang erreichte jedoch kein Meßpunkt der verschiedenen Neigungen Temperaturen von 10 °C. Im Sommer waren die Temperaturdifferenzen zwischen dem wärmeren Nord- und dem kühleren Südhang erheblich geringer ausgeprägt und betragen nur 3 °C. Damit zeigt sich während einer kurzen Zeit im Sommer – bei annäherndem Senkrechtstand der Sonne – die Wärmeverteilung nahezu ausgeglichen.

Beziehungen der Bodentemperaturen zu Lageparametern der Meßstellen

Um die Abhängigkeit der in 50 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen von der Höhe der Meßstellen und den jeweiligen Meßzeitpunkten festzustellen, wurde die Methode einer multiplen linearen Regression angewandt. Als Datenbasis diente das maximal verfügbare Kollektiv der Messungen zwischen August und Oktober 1981. Das Ergebnis der statistischen Analyse erweist, daß nur die Höhe mit einem Koeffizienten von -0,779 eine hohe, natürlicherweise negative Korrelation mit der Temperatur zeitigt. Der zweiten unabhängigen Variablen eignet mit der Temperatur nur ein Korrelationskoeffizient, der deutlich unter 0,1 liegt. Im Gesamtmodell erklärt die Höhe 61% der Gesamtvarianz der Bodentemperaturen.

Die gemessenen Bodentemperaturen sind also in dem Meßzeitraum linear weitgehend unabhängig von dieser weiteren Variablen. Nach der geringen Varianzerklärung des Zeitpunktes der Messungen ist zu schließen, daß sich während der Monate August bis Oktober 1981 die Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe gegenüber ihrem Höhenwandel kaum verändert haben. Sie können daher als repräsentativ für die späte Trockenzeit angesehen werden. Exposition und Hangneigung der Meßstellen lassen sich in ihrer Beeinflussung der Bodentemperaturen durch ein lineares Regressionsmodell nicht beschreiben.

Der aus allen in 50 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen im Untersuchungsgebiet errechnete mittlere Höhengradient beträgt nach dem multiplen Regressionsmodell 0,687 °C/100 m und ähnelt damit durchaus dem Wert, der sich aus den Messungen der Bodentemperatur auf waagerechten Flächen verschiedener Höhenlage nach einer linearen Einfachregression ergab (0,61 °C/100 m).

Die Residuen der tatsächlich gemessenen Bodentemperaturen von den Erwartungswerten des multiplen Regressionsmodells wurden in eine Karte des engeren Arbeitsgebietes

tes eingetragen (Abb. 14a). Hierbei zeigt sich nun deutlich die Abhängigkeit der Temperatur von der Exposition, die in das lineare Regressionsmodell nicht integriert werden konnte. Alle nördlich exponierten Hänge besitzen positive Residuen, die bei optimaler Hangneigung mehr als 5 °C von den Modellwerten abweichen. Die maximale positive Abweichung ist wiederum am unteren Sacanagon-Hang festzustellen. Eine entsprechende Überwärmung hatte bereits die Isothermenkarte der 50 cm-Bodentemperaturen erwiesen (vgl. Abb. 12a). Die weitere Umgebung dieser Zone maximaler positiver Residuen zeigt z. B. am Hang bei Charazani und unterhalb von Kaata eine Abweichung von +2,5° bis +5 °C an. Schwächere positive Residuen erweisen die Talbereiche und die oberen Hangpartien. Hier liegt die Überwärmung in einer Größenordnung von weniger als +2,5 °C. Die südlich exponierten Kuppen des Hanges bei Curva und an der Charazani gegenüberliegenden Bergflanke weisen ebenfalls noch positive Residuen auf. Den relativ flachen Kuppen kommt trotz ihrer Südexposition wegen der geringen Übersattung etwas mehr als der durchschnittliche Strahlungsgenuß zu. Ansonsten zeigen sich an allen in südliche Richtungen exponierten Hänge negative Residuen. Insbesondere die steilen Südhänge, wie z. B. unterhalb von Chullina sowie der westlich daran anschließende Hang besitzen Residuen, die um mehr als 2,5 °C tiefer liegen als nach dem Modell errechnet. Auch der Südosthang im mittleren Tal bei Amarete fällt in diese Residuenklasse.

Die Abb. 14b zeigt ein Temperatur-Residuendiagramm, dem auf der Abszisse die standardisierten, tatsächlich gemessenen Temperaturen (mit einem Mittelwert von 9,2 °C in 3500 m Höhe und einer Standardabweichung von 4 °C bezogen auf 600 m Höhendifferenz), auf der Ordinate die standardisierten Residuen (Standardabweichung $s = 2,5$ °C) eingetragen sind. Jede Meßstelle ist in diesem zweidimensionalen Feld als ein Punkt eingetragen. Es erweist sich, daß die Streuung der Residuen bei hohen Temperaturen, d. h. in geringen Höhen, relativ stark ist, wenn auch Abweichungen von mehr als 2 s vom Mittelwert in 3% der Fälle noch innerhalb des Rahmens der Standardnormalverteilung (5%) liegen. Für niedrigere Temperaturen, d. h. also in größeren Höhen, vermindert sich die Streuung der Residuen markant.

Es zeigt sich in diesem Diagramm wie in der Residuenkarte (Abb. 14a) eindrucksvoll, daß sich mit zunehmender Höhe die Expositionsunterschiede auf die Bodentemperaturen immer schwächer auswirken.

Schemata der Bodentemperaturen in Abhängigkeit von Exposition und Neigung in verschiedenen Höhen

Die in 50 cm Tiefe von August bis Oktober 1981 gemessenen Bodentemperaturen wurden in ein Schema eingetragen (vgl. Abb. 15a–d), in dem ein Koordinatensystem der Expositionen (entsprechend der Windrose) und die Hangneigungen (bis 45°) kombiniert sind. Daraus läßt sich die Abhängigkeit der Bodentemperatur von beiden genannten Parametern vergleichend für Höhen von 4500 m, 4000 m, 3500 m und 3000 m betrachten.

Im Höhenbereich von 4500 m tritt eine expositions/neigungsbedingte Bodentemperaturdifferenz von weniger als 3° auf. Der mit Temperaturen von 3° bis 4 °C wärmste Bereich umfaßt die Hänge nördlich exponierter Segmente mit Temperaturmaxima bei Hangneigungen von 15°. Bei südlichen Auslagen nimmt die Bodentemperatur mit steigender Hangneigung allmählich ab, so daß bei 40° bis 45° Neigung Temperaturwerte von 1 °C unterschritten werden.

Das Diagramm zeigt für Höhen um 4000 m NN eine Steigerung der Differenz zwischen den Temperaturen der günstigsten und ungünstigsten Neigungs- und Expositionsverhältnisse. Die nordexponierten Hänge von über 40° Neigung sind nach diesem Modell mit über 9° Bodentemperatur am wärmsten. Die kühlest Temperaturen (unter 3 °C) liegen an den südexponierten Hängen mit Neigungen von mehr als 40°. Die Differenz beträgt also 6 °C. Leicht begünstigt sind Nordwesthänge gegenüber Nordosthängen. Auf den ebenen Flächen beträgt die 50 cm-Bodentemperatur 6,5 °C. Der Gradient in dem Höhenintervall zwischen 4500 m und 4000 m liegt für ebene Flächen bei $-0,6$ °C/100 m.

Im Höhenbereich um 3500 m zeigen sich bereits stärkere Temperaturgegensätze. Die Differenzen zwischen den 35° geneigten N-NNW exponierten Hängen (13 °C) und den S-SW exponierten Hängen (< 6 °C) betragen 7° bis 8 °C. Die 50 cm-Bodentemperatur erreicht in dieser Höhe auf den waagerechten Flächen 9,5 °C. Dies entspricht ebenfalls einem Temperaturgradienten von $-0,6$ °C/100 m für das Intervall zwischen 4000 m und 3500 m.

Für untere Höhen um 3000 m ergibt sich das am stärksten differenzierte Bild. Die 30° nach N-NE geneigten Hänge weisen Temperaturen von über 18 °C auf. An den steilen, SSW gerichteten Hängen werden Temperaturen von unter 8 °C gemessen. Die Isolinien der 50 cm-Bodentemperaturen lassen also eine Differenz von mehr als 10 °C erkennen. Die waagerechte „Normfläche“ weist eine Temperatur um 12,5 °C aus, die in dieser Höhe der Hüttenlufttemperatur weitgehend entspricht. In diesem Höhenbereich integrieren die starken Expositions- und Neigungseinflüsse mehrere Klimaeffekte der tiefen Taleinschnitte: Übersattung, Kaltluftseebildung und Talwindphänomene.

Als genereller Temperaturgradient zwischen 3000 m und 4500 m ergibt sich ein Wert von $-0,6$ °C/100 m. Die Grafiken der Abb. 15a–d bestätigen die bisherigen Ausführungen zu anderen Wärmeparametern während des Übergangs von der Trockenzeit in die Regenzeit zwischen August und Oktober. Dies betrifft insbesondere die maximale Wärmegunst der NNW-Exposition und die stärkste thermische Benachteiligung von SSW-Expositionen.

Zusammenfassung

Aufgrund von geländeklimatischen Studien können für den Untersuchungsraum folgende typische Klimaphänomene abgeleitet werden:

Das Kallawaya-Gebiet liegt makroklimatisch im semi-humid/semi-ariden, zertalten Punabblock unter einem typischen Humiditäts- und Temperaturgang der äußeren Tro-

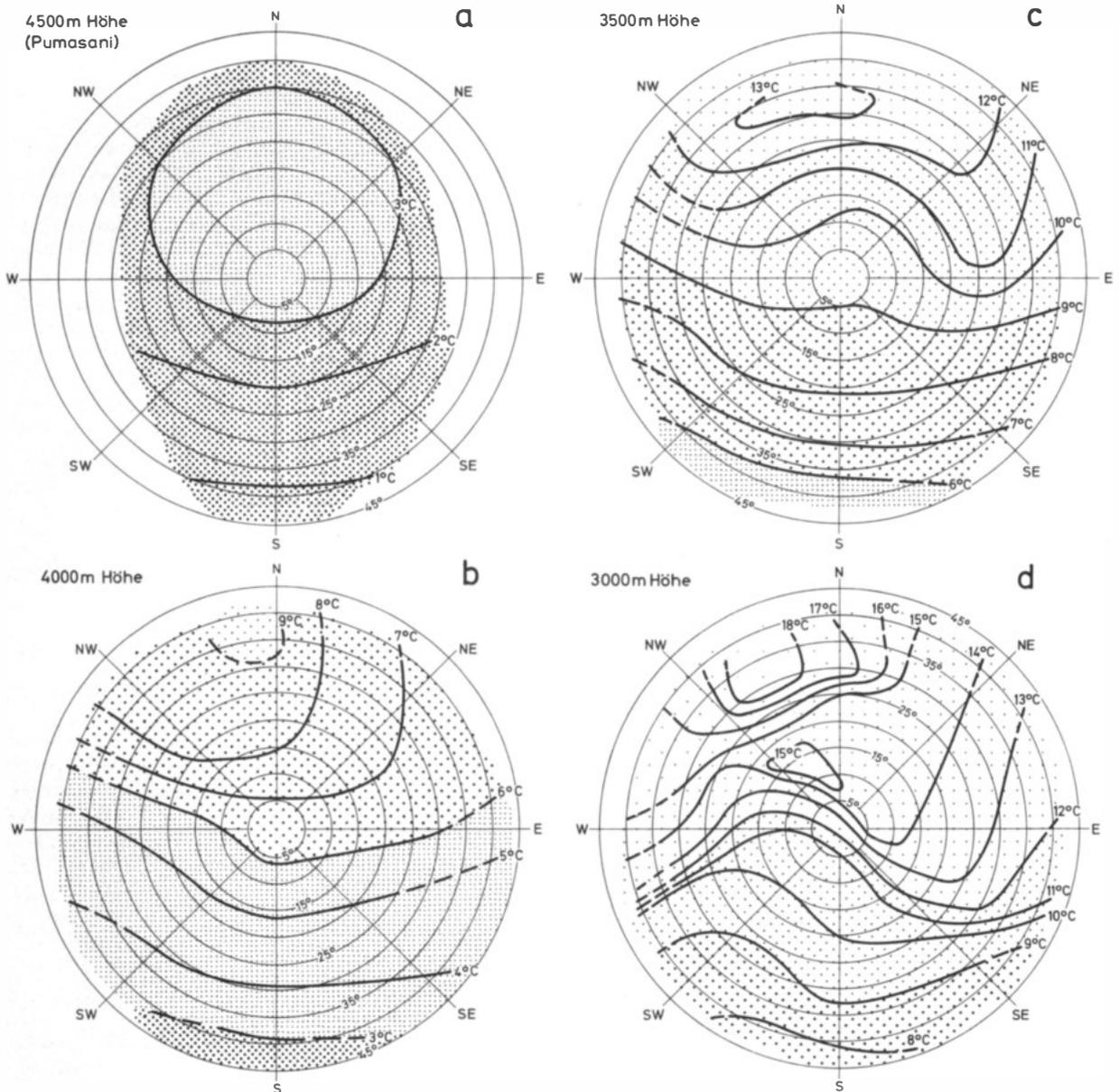


Abb. 15: Abhängigkeit der 50 cm-Bodentemperaturen von Exposition und Hangneigung in verschiedenen Höhen (Aug.–Okt. 1981)
 The 50 cm-soil-temperatures as a function of exposition and inclination at different elevations (Aug.–Oct. 1981)

pen (sommerliche Regenzeit, winterliche Trockenzeit, Temperaturkurve mit zwei Wärmegipfeln am Beginn und Ende der Regenzeit bei Sonnenhöchststand).

Geländeklimatisch ist der Untersuchungsraum durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

1. Im Höhenintervall zwischen 3400 m und 4200 m – dem Bereich der sogenannten Cabeceras de los valles – ist eine

markante Temperatur-/Feuchtigkeitsinversion ausgebildet.

2. Das Untersuchungsgebiet liegt im Frostbereich der äußeren Höhentropen. Die mittlere Untergrenze des Frostwechsels beginnt in ca. 3200 m Höhe, doch bilden sich als Ausnahmen Fröste in Kaltluftseen auch in tieferen Lagen bis 2700 m abwärts aus. Eine sprunghafte Zunahme der Frostwechseltage erfolgt im Höhenintervall zwischen 3800 m und

4200 m. Mehr als 320 Frostwechseltage werden oberhalb 4500 m registriert. Die Frostwechseltage bestimmen Art und Höhengrenzen des landwirtschaftlichen Anbaus.

3. Das Tal-/Bergwindssystem ist immanenter Bestandteil des täglichen Wetterablaufs. Ausnahmen treten unter dem Einfluß allochthoner Wetterlagen in größeren Häufigkeiten während der Regenzeit auf.

4. Die Einstrahlungsverhältnisse folgen dem jährlichen Sonnengang unter Beeinflussung durch die regenzeitliche Bewölkung.

5. Theoretische Besonnung (berechnet) und Oberflächenstrahlungstemperatur (gemessen mit einer IR-Sonde) zeigen mit dem scheinbaren Jahresgang der Sonne klare Abhängigkeiten von den Expositionen und den Hangneigungen. Die Höhenkomponente wird durch die Art des Reliefs und den Schattenfall höhenwärts mit abnehmenden Temperaturdifferenzen stark variiert.

6. Die Bodentemperatur in 50 cm Tiefe erweist sich als ein bedeutendes ökologisches Wärmemaß. Gemessen auf beschatteten ebenen Flächen beschreibt sie annähernd den mittleren Temperaturgang ohne Zeitverzögerung, wie er auch in der Wetterhütte gemessen wird. Alle der Sonne günstig ausgesetzten Expositionen und Hangneigungen sind in der sonnenfernsten Jahreszeit bis zu 5 °C wärmer, alle ungünstig der Sonne ausgesetzten Expositionen und Hangneigungen sind bis zu 5 °C kühler als die Normtemperatur. Die Differenzen verringern sich beim Zenitstand der Sonne bis auf ca. 1 °C.

7. Isothermenkarten der 50 cm-Bodentemperatur zeigen in ihrem Verhältnis zum Sonnengang eindeutige Abhängigkeiten von der Topographie.

8. Überprüfungen der Datenkollektive mit Hilfe statistischer Verfahren (schrittweise multiple Regression) erweisen für eine gegebene Jahreszeit, in der die Temperaturbeeinflussung durch die Sonne annähernd gleich bleibt, eine hohe Korrelation der 50 cm-Bodentemperatur mit der Höhe.

9. Der mittlere Höhengradient der Temperatur beträgt im Untersuchungsgebiet 0,6° bis 0,7 °C/100 m, erwiesen durch Stationsvergleich und die gemessenen Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe. Die tägliche Überwärmung vieler Hangpartien und die natürliche Kaltluftseenbildung verursachen jedoch extreme intradiurne (adiabatische) Umschichtungsprozesse.

Die ökologischen Konsequenzen der thermischen Differenzierung

Die aufgezeigte thermische Differenzierung des engeren und des weiteren Arbeitsgebietes im tropischen Hochgebirgstal der Kallaway-Region in Nord-Bolivien ist eine Grundbedingung für die ökologische Differenzierung in Raum und Zeit. In der Abb. 2 sind in einem Idealschema Landnutzung und Vegetation in ihrer Höhenabhängigkeit integriert dargestellt. Dazu sind die verschiedenen thermischen Werte der Bodentemperaturen und der Lufttemperaturen sowie temperaturbedingte Landschaftsphänomene eingetragen. Es zeigt sich deutlich die thermische Abhängig-

keit der landwirtschaftlichen, vegetationsgeographischen und geomorphologischen Differenzierung des engeren Arbeitsgebietes. Basis dieser Differenzierung sind die in 50 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen, da nur sie einen mittleren Ausdruck des Wärmeklimas anbieten.

Als thermisch markierte Landschaftsgrenzen erster Ordnung treten hervor: die rezente Waldgrenze (2700 m Höhe), bis zu der noch Zitrusfrüchte, Coca und Zuckerrohr angebaut werden; die Obergrenze des Weizenanbaus (3600 m Höhe); die Obergrenze der Knollenfrüchte in ca. 4100/4300 m, die zugleich die obere Ackerbaugrenze darstellt. Eine kulturtechnisch interessante Höhengrenze ist die Untergrenze der Chuño-Herstellung in 3900 m. Das thermische Klima setzt der Weidewirtschaft oberhalb von 4800 m NN ihre Schranken. Dort beginnt die Anökumene der Frostschuttlzone. Sie leitet bei 5300 m in die nivale Stufe der vergletscherten Hochgebirgsregion über. Es treten über 340 Frostwechseltage auf, zu denen noch einige Eistage hinzukommen.

Literatur

- CIEZA DE LEON, P.: Primera Parte de la Crónica del Perú. Sevilla 1553.
- FURRER, G., GRAF, K.: Die subnivale Höhenstufe am Kilimandjaro und in den Anden Boliviens und Ecuadors. In: TROLL, C., LAUER, W. (Hrsg.): Geoökologische Beziehungen zwischen der temperierten Zone der Südhalbkugel und den Tropengebirgen. Erdwissenschaftliche Forschung 11. Wiesbaden 1978, S. 441–457.
- GESSLER, R.: Die Stärke der unmittelbaren Sonnenbestrahlung der Erde in ihrer Abhängigkeit von der Auslage unter den verschiedenen Breiten und zu den verschiedenen Jahreszeiten. Veröff. d. Preuß. Meteorol. Inst. Nr. 330, Abh. Bd. VIII, Nr. 1, Berlin 1925.
- GRAF, K.: Zum Höhenverlauf der Subnivalstufe in den tropischen Anden, insbesondere in Bolivien und Ecuador. In: Z. Geomorph., N. F., Suppl.-Bd. 37, 1981, S. 1–24.
- HANN, J.: Das Klima des Hochlandes von Peru und Bolivien. In: Pet. Geogr. Mitt., 49. Bd., 1903, S. 280–282.
- HASTENRATH, S.: Beobachtungen zur klimamorphologischen Höhenstufung der Cordillera Real (Bolivien). In: Erdkunde, Bd. XXV, 1971, S. 102–108.
- HERZOG, T.: Die bolivianischen Kordilleren. In: Pet. Geogr. Mitt., 59. Jg., I. Halbbd., 1913, S. 192–195 u. 247–250.
- JUNGHANS, H.: Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. Abh. d. Meteorol. Dienstes d. DDR, Bd. XI, Nr. 85, Berlin 1969.
- KAEMPFERT, W., MORGEN, A.: Die Besonnung. Diagramme der solaren Bestrahlung verschiedener Lagen. In: Z. f. Meteorol. Bd. 6, H. 5, 1952, S. 138–146.
- KAERGER, K.: Landwirtschaft und Kolonisation im spanischen Amerika. II. Bd. Leipzig 1901.
- KESSLER, A.: Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien, Peru) während des Hochstandes der letzten Vereisung. In: Erdkunde, Bd. XVII, 1963, S. 165–175.
- : Über den Tagesgang von Oberflächentemperaturen in der Bonner Innenstadt an einem sommerlichen Strahlungstag. Ein Beitrag zur Infrarotthermometrie. In: Erdkunde, Bd. XXV, 1971, S. 13–20.

- LAUER, W.: Klimatische Grundzüge der Höhenstufung tropischer Gebirge. In: Tagungsber. u. wiss. Abh. 40. Dtsch. Geographentag Innsbruck 1975. Wiesbaden 1976, S. 76–90.
- : Timberline Studies in Central Mexico. In: Arctic and Alpine Research, Vol. 10, Nr. 2, 1978, S. 383–396.
- : Im Vorland der Apolobamba-Kordillere. Physisch-geographische Beobachtungen auf einer kurzen Studienreise nach Bolivien. In: HARTMANN, R., OBEREM, U. (Eds.): Estudios Americanistas II, Homenaje a H. Trimborn. Coll. Inst. Anthr. 21. St. Augustin 1979, S. 9–15.
- LAUER, W., KLAUS, D.: Geocological Investigations of the timberline of Pico de Orizaba, Mexico. In: Arctic and Alpine Research, Vol. 7, Nr. 4, 1975, S. 315–330.
- : The thermal Circulation on the Central Mexican Meseta Region within influence of the trade winds. In: Arch. f. Met., Geophys. u. Bioklim., Ser. B, 23/4, S. 343–366.
- MAHNKE, L.: Zur indianischen Landwirtschaft im Siedlungsgebiet der Kallawayas (Bolivien). In: Erdkunde, Bd. 36, 1982, S. 247–254. *Meteorologisches Taschenbuch*. LINKE, F., BAUR, F. (Hrsg.): II. Bd., 2. Aufl., Leipzig 1970.
- MILANKOVITCH, M.: Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen. In: KÖPPEN, W., GEIGER, R. (Hrsg.): Handbuch der Klimatologie, Bd. I, Teil A. Berlin 1930.
- SCHOOP, W.: Güteraustausch und regionale Mobilität im Kallawayata (Bolivien). In: Erdkunde, Bd. 36, 1982, S. 254–266.
- SEIBERT, P.: Ökosystemforschung in den bolivianischen Anden. In: Naturwiss. Rdsch., 35. Jg., H. 4, 1982, S. 147–157.
- TROLL, C.: Die geographischen Grundlagen der andinen Kulturen und des Inkareiches. In: Ibero-Amerik. Archiv, Bd. 5, H. 3, 1931, S. 258–294.
- : Die Stellung der Indianer-Hochkulturen im Landschaftsaufbau der tropischen Anden. In: Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. zu Berlin, Nr. 3/4, 1943, S. 93–128.
- : Die Frostwechselhäufigkeit in den Luft- und Bodenklimaten der Erde. In: Met. Z. 60, 1943, S. 161–171.
- : Die Lokalwinde der Tropengebirge und ihr Einfluß auf Niederschlag und Vegetation. In: Studien zur Klima- und Vegetationskunde der Tropen. Bonner Geogr. Abh., H. 9, 1952, S. 124–182.
- TSCHUDI, J. J. v.: Peru. Reiseskizzen aus den Jahren 1838–1842, II. Bd. St. Gallen 1846.
- WALTER, H., MEDINA, E.: Die Bodentemperatur als ausschlaggebender Faktor für die Gliederung der subalpinen und alpinen Stufe in den Anden Venezuelas. In: Ber. d. Dtsch. Bot. Ges. 82, 1969, S. 275–281.
- WINIGER, M.: Bodentemperaturen und Niederschlag als Indikatoren einer klimatisch-ökologischen Gliederung tropischer Gebirgsräume. Methodische Aspekte und Anwendbarkeit dargelegt am Beispiel des Mt. Kenya. In: Geomethodica 4, 1979, S. 121–150.
- : Zur thermisch-hygrischen Gliederung des Mount Kenya. In: Erdkunde, Bd. 35, 1981, S. 248–263.

ZUR INDIANISCHEN LANDWIRTSCHAFT IM SIEDLUNGSGEBIET DER KALLAWAYAS (BOLIVIEN)

Mit 3 Abbildungen, 3 Photos und 3 Tabellen

LOTHAR MAHNKE

Summary: On Indian agriculture in the Kallawayas settlement area

Thanks to their particular location within the Cordilleras, the altitudinal stages in the Kallawayas valley follow one another at close intervals. The agrarian structure is well adapted to the natural conditions, especially in its surviving pre-Spanish elements; the most important aspects of adaptation being cultivation on terraces, the use of the tacla (and of the hoeing plough), intensification with the aid of irrigation, conservation of tuber crops, the crop rotation system and the aid of fallow periods, and distribution of cultivation areas over different altitudinal levels. Outside influences are liable to lead to rapid disturbance of the ecological equilibrium.

Nördlich des Titicacasees lebt nahe an der Grenze zu Peru die Indianergruppe der Kallawayas in einem noch fast ganz abgeschlossenen Gebiet. Die Ostkordillere der bolivianischen Anden wird hier durch die Cordillera de Muñecas gebildet, die das Verbindungsglied zwischen der Cordillera de

Apolobamba und der Cordillera Real darstellt. Dieser Kordillerezug wird von zwei Durchbruchstätern – die Täler von Charazani und Consata – durchbrochen und ist durch zahlreiche Flußläufe, die zum Rio Charazani und zum Rio Consata entwässern, nach Osten stark aufgelöst.

Die Kallawayas leben in dem Talsystem von Charazani und haben so einen direkten Zugang zu der östlich der Kordillere gelegenen Yungas-Zone bei Camata. Solche Durchbrüche finden sich in den Anden nur an sehr wenigen Stellen und es darf angenommen werden, daß deshalb das Charazani-Tal schon in inkaischer Zeit eine herausgehobene Rolle gespielt hat. Das Gebiet lag direkt an der Grenze der äußersten Ausdehnung des Inkareiches und erlaubte einen Zugang in die Gebiete, in denen Coca angebaut wurde. Die Coca, die im gesellschaftlichen Leben der Inkas von großer Bedeutung war, konnte im höher gelegenen Kernbereich der Inkaherrschaft nicht angebaut werden.