

- : Land Tenure and Social Structure in Rural Java. In: Rural Sociology 25, 1960, S. 414–430.
- LEEMANN, A.: Veränderte Methoden der Reisernte. Ländlicher Wandel in Java. In: Geographica Helvetica 4, 1978, S. 173 ff.
- : Reiche Armut. In: Merian 31, H. 10, 1978, S. 45–48.
- : Bali. Innsbruck 1979.
- METZNER, J.: Agrarräumliche Ungleichgewichte und Umsiedlungsversuche auf den östlichen Kleinen Sundainseln. In: Dynamik der Landnutzung in den wechselfeuchten Tropen. Gießener Beiträge zur Entwicklungsforschung, Reihe 1, Bd. 4, Gießen 1978.
- POWELL, M. T.: Agricultural Extension and Water Management. In: Ztschr. f. ausl. Landwirtschaft 16, 1977, S. 252–267.
- RÖLL, W.: Indonesien. In: UHLIG, H. (Hrsg.): Südostasien, Austral-Pazifischer Raum. Frankfurt-Hamburg 1975, S. 300 ff.
- SMIT, A.: Gemeinschaft der Zufriedenen: Die Desa. In: Merian 31, H. 10, 1978, S. 27–35.
- SUTAWAN, N. u. a.: Community-based Irrigation System in Bali, Indonesia. Denpasar 1983 (Maschinenmanuskript).
- UHLIG, H.: Innovationen im Reisbau als Träger der ländlichen Entwicklung in Südostasien. In: RÖLL, W., SCHOLZ, U. u. UHLIG, H. (Hrsg.): Symposium „Wandel bäuerlicher Lebensformen in Südostasien“. Gießen 1980, S. 29–72.
- VOLLENHOVEN, C. VAN: Het Adatrecht van Nederlandsch-Indië, Teil I. Leiden 1918.

## BERICHTE UND MITTEILUNGEN

### BODENTEMPÉRATURMESSUNGEN IN TROPISCHEN GEBIRGEN –Virunga-Vulkane (Ruanda), Sierra Nevada (Kolumbien), Papua-Neuguinea –

Mit 1 Abbildung

HORST DRONIA\*)

*Summary:* Measurements of soil temperature in tropical mountains

Thanks to the isothermal temperature regime in the inner tropics, the mean annual temperature of a location can be established by means of temperature measurements at soil depths of 40–60 cm. This method was employed for the investigation and interpretation of the lapse rate in three tropical mountain ranges, following profile routes up to the high alpine region.

H. WALTER und E. MEDINA (1969) bezeichnen die Bodentemperatur als den ausschlaggebenden Faktor für die Gliederung der subalpinen und alpinen Stufe. Insbesondere in den tropischen Gebirgen konnte man zunächst bei weitgehender Isothermie des Jahrgangs der Temperatur davon ausgehen, daß die Bodentemperatur, gemessen in 40–60 cm Tiefe, an einem überschatteten Standort auf ebener Fläche etwa die Jahresmitteltemperatur bzw. ihren schwachen Gang, wie er in Wetterhütten gemessen wird, widerspiegelt. Das beruht auf der Erfahrung, daß unter innertropischen Wärmebedingungen schon in 40 cm Tiefe zeitliche Isothermie erreicht wird. WALTER u. MEDINA hatten schon 1969 in den venezolanischen Tropen, wo die Jahresschwankung

der Lufttemperatur nur ca. 1 Kelvin beträgt, an ganzjährig beschatteten Standorten die Mitteltemperatur des Jahres anhand von Bodentemperaturmessungen in 45 cm Tiefe approximiert.

In den äußeren Tropen, zum Beispiel in Bolivien, hat W. LAUER (1977, 1982) festgestellt, daß unter den genannten Bedingungen in 50 cm Bodentiefe auch der schwache Jahresgang der monatlichen Mitteltemperaturen nachgezeichnet wird. Dieser Effekt liegt in der Hauptsache darin begründet, daß Tagesschwankungen der Temperatur in den Tropen nur unbedeutend in den Boden eindringen, da in einem tropischen Tageszeitenklima im Jahresablauf nur geringe

\*) Der Verfasser dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die die Kosten der Reise getragen hat, dem Deutschen Wetterdienst und dem Bundesminister für Verkehr für die Freistellung vom Dienst, Herrn Professor LAUER (Bonn) für die Anregung zu diesen Meßserien sowie für fachliche Beratung, Herrn Professor LÖFFLER (Erlangen) für organisatorische Hinweise, dem Ehepaar BERGHÜSER in Port Moresby sowie Fr. A. BULLA von der kath. Mission in Kegsugl in der Provinz Simbu in Papua für wirksame Hilfe im Lande.

Schwankungen der Tages- und Monatsmitteltemperaturen auftreten. In besonnten Bereichen weichen die entsprechenden Bodentemperaturen in der Regel jedoch 2 bis 3 K von dem Normmittel ab. Entsprechende Abweichungen werden natürlich auch durch Exposition und Hangneigung verursacht (LAUER 1982).

WALTER u. MEDINA haben in Venezuela überdies festgestellt, daß sich die Waldgrenze in den Tropen erstaunlich konstant in einem Bereich von Erdbodentemperaturen zwischen 7 und 9 °C befindet. Die Botaniker begründen dies damit, daß die für die Baumwurzeln und ihre komplizierte Vernetzung mit dem Boden notwendigen physiologischen Abläufe unterhalb dieses Grenzbereichs nicht mehr ausreichend funktionieren. Die Erweiterung unserer Kenntnisse über die geographische Verteilung dieser Grenzbedingungen, von denen auch Gedeihen von Land- und Forstwirtschaft in den Entwicklungsländern abhängen, ist ein wesentlicher Grund für diese Untersuchungen. Dies auch deshalb, weil die Temperaturen *unter* der Erdoberfläche von forstlicher und agrarischer Seite offensichtlich bisher nicht voll beachtet worden sind.

Legt man an tropischen Gebirgen ein Höhenprofil von Bodentemperaturen in 50 cm Tiefe, so ergibt sich mit der Höhe eine Temperaturabfolge, wie sie den jeweiligen Mittelwerten des Jahres oder doch wenigstens einer gut definierten Jahreszeit (Regen- oder Trockenzeit) entspricht. Bodentemperaturprofile sind schon an mehreren Tropenbergen gemessen worden, so u. a. von WINIGER (1978) am Mount Kenya, von FRÖHLICH u. WILLER (1977) am Kilimandscharo, von LAUER u. KLAUS (1975) am Pico de Orizaba (Mexiko) sowie von LAUER (1977, 1982) im Vorland der Apolobamba-Kordillere (Bolivien). Soweit bekannt, geschah dies jedoch nirgends in der östlichen Erdhälfte und auch in Afrika und Amerika offenbar mehr an den eher trockenen Hochlagen.

Im folgenden werden Beispiele für Höhenprofile aus dem *östlichen Zentralafrika* (Ruanda), *Kolumbien* (Sierra Nevada de Santa Marta) und aus *Papua-Neuguinea* dargestellt und interpretiert. Mit den Virunga-Vulkanen am Rande des Afrikanischen Grabenbruchs, der Sierra Nevada der nordkolumbianischen Anden und dem Hochgebirge Neuguineas sind in jüngerer Zeit drei Gebirgszonen erfaßt worden, die im zirkunglobalen Tropengürtel für die mehr feuchten Hochländer bis etwa 4000 m Höhe repräsentativ sein dürften. Die noch etwas trockeneren Hochlagen, z. B. die Anden um den Altiplano, der Kilimandscharo und andere, sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Ihre thermischen Verhältnisse mit den starken Tagesschwankungen der Temperatur und den ausgeprägten Expositionsunterschieden machen sie mit den mehr ozeanischen Gebirgstypen schlecht vergleichbar.

Der Verf. hat die Erdbodentemperaturen in 2, 5, 10, 20, 30 und 50 cm Tiefe gemessen und dafür möglichst im Abstand von 200 Höhenmetern eine entsprechende Grube ausgehoben. Die Profile reichten in Ruanda von 1500 bis 4500 m, in Kolumbien von Meereshöhe bis 3600 m und in Papua von Meereshöhe bis 4000 m. Gemessen wurde mit einem kleinen Taschenthermometer, das gelegentlich mit einem Eichthermometer kontrolliert wurde.

#### Die Messungen

Im Rahmen einer Exkursion zu den Virunga-Vulkanen in Nordruanda (höchster Gipfel: Karisimbi, 4507 m), etwa 300 km westlich des Victoriasees, konnten einige Meß-

profile während der sog. kleinen Trockenzeit im Januar gewonnen werden. Die Messungen der tieferen Niveaus wurden in dem weitgehend kultivierten Bergland meist in waldfreiem, aber bewachsenem Gelände durchgeführt; in den höheren Lagen geschah dies in natürlicher Vegetation. Die Waldgrenze des hier noch bestehenden Primärwaldes liegt bei 3000 m. Oberhalb 4500 m beginnt die fast vegetationslose subnivale Gebirgsstufe. Die an allen Meßorten vorhandene Bodenbedeckung verminderte, je nach Dichte des Bewuchses, erwartungsgemäß die Tagesschwankung der Temperatur in allen Schichten und damit auch den Unterschied der Temperaturen zwischen 2 und 50 cm Tiefe.

Die bei durchweg hoher Luftfeuchte meist starke, oft geschlossene Bewölkung wirkte im selben Sinne ausgleichend und amplitudenverkleinernd, so daß die geringen Unterschiede zwischen 2 und 50 cm Tiefe auch dadurch verständlich werden. (Die Werte werden im Rahmen dieses kurzen Berichtes hier nicht einzeln aufgeführt.) In der sog. großen Trockenzeit dürften die Differenzen größer, in der Regenzeit aber geringer sein, so daß man annehmen kann, daß die hier gemessenen Werte in etwa die mittleren Jahresverhältnisse wiedergeben. Eine Tagesschwankung der Temperatur in 50 cm Tiefe konnte nicht festgestellt werden.

Auf einer weiteren Exkursion in den nördlichen isolierten Ausläufer der südamerikanischen Kordillere, in die Sierra Nevada Santa Marta (Gipfelhöhe 5700 m), dicht an der karibischen Küste Kolumbiens, konnte ein ähnliches Meßprogramm bis zu 3500 m Höhe durchgeführt werden. Die Messungen fielen hier ebenfalls in eine relativ trockene Zeit,

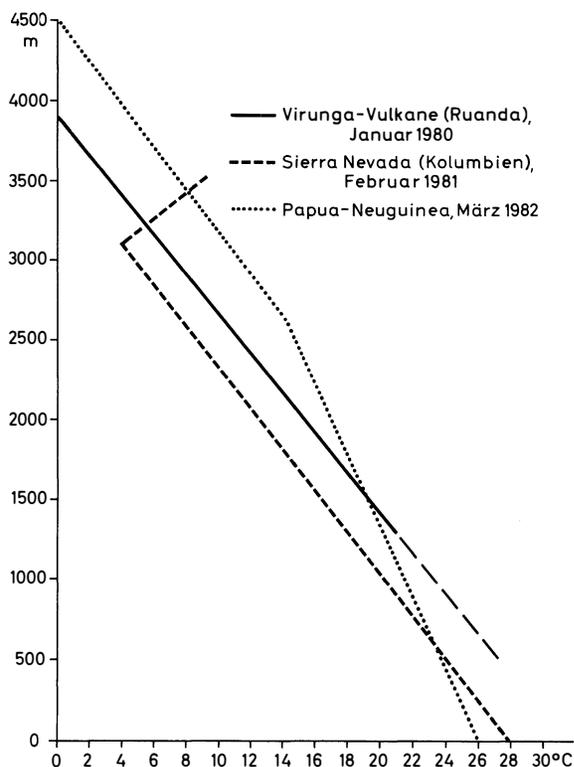


Abb. 1: Profile der Erdbodentemperaturen in 50 cm Tiefe  
Soil temperature profiles at a depth of 50 cm

die in den tieferen Lagen, vor allem im Osten des Gebirgsstocks, stark, bergwärts jedoch durch die beherrschend werdende Konvektion nur schwach ausgeprägt ist. Die Meßorte lagen unter verschiedenen dichter und hoher Vegetationsdecke, die zum Teil für verhältnismäßig große Temperaturunterschiede zwischen oberen und tieferen Bodenschichten sowie einen ausgeprägten Tagesgang sorgte. Vor allem in größeren Höhen nahm strahlungsbedingt die Temperaturamplitude deutlich zu und überschritt in 2 cm Tiefe 11 Kelvin.

In der Regenzeit dürfte sich bei dann vorherrschenden südwestlichen Winden die Tagesamplitude vermindern, so daß sich die Meßwerte für die oberen und unteren Bodenschichten annähern. Somit dürfen diese Werte, wie auch in Ruanda, als genügend repräsentativ für die Hochlagen der passatbeeinflussten inneren Tropen angesehen werden. Das auffälligste Phänomen des Temperaturverlaufs ist die scharfe Umkehr der Temperaturabnahme in eine leichte Zunahme oberhalb von 3100 m (vgl. Abb. 1). Dies scheint offenbar auf die verstärkte Einstrahlung in den Boden zurückzuführen sein, die bemerkenswerterweise wohl nur verzögert durch eine gleich große Wärmeabfuhr ausgeglichen wird. Diese Temperaturinversion mit der Höhe haben auch FRÖHLICH u. WILLER (1977) unter ähnlichen Verhältnissen an dem dem Karisimbi benachbarten Sabinyo in Ruanda oberhalb von 3000 m gefunden.

Die eingangs erwähnte Regel der Waldgrenzenlage im Bereich zwischen 7 und 9 °C konnte in Ruanda mit +7 °C in 3000 m gut bestätigt werden; in Kolumbien lag sie in den Meßgebieten in 2900 m bei 6 °C.

Der Großteil aller Meßorte des 3. Arbeitsgebietes, 76 von 83, liegt in Papua-Neuguinea zwischen 6 und 10° südlicher Breite und zwischen 50 und 4000 m Höhe. Die Messungen, insgesamt rund 500 (je 6 pro Meßstelle), wurden von Anfang März bis Anfang April durchgeführt. Im einzelnen verteilen sich die Messungen auf drei Gebiete: 1. auf das Tiefland an der Südküste nahe der Hauptstadt Port Moresby (9,5° S), wo Höhen zwischen 50 und 800 Metern erfaßt wurden, 2. auf das mittlere Hochland um Wau (7,5° S) bis 2300 m und 3. auf das zentrale Bergland im Osten des Mount-Wilhelm-Massivs (6° S) von 1700 bis 4000 m.

In Anbetracht der herrschenden Witterung mit deutlich vermindertem Strahlungsumsatz waren diesmal die Gesichtspunkte, wie die tagesgangfreie Bodentemperatur zum einen von der Höhe über dem Meer und zum anderen von der Dichte der Vegetation abhängt, vorrangig interessant. Meßwerte von Tagen mit unbehinderter Ein- und Ausstrahlung waren nicht zu gewinnen. Auch von daher sind entsprechende Vergleiche von Ort zu Ort oder von Tag zu Tag nicht ohne weiteres möglich. Soweit in der gleichen Höhe durchführbar, wurden sowohl Bodentemperaturen unter möglichst dichtem Bewuchs, idealerweise unter tropischem Regenwald, als auch unter möglichst wenig bewachsenem Boden gemessen. Die Tageszeit der Messung war auf die Temperatur in 50 cm Tiefe ohne jeden Einfluß. Selbst in unbewachsenem Ackerboden gab es zwischen Tagen mit Einstrahlung und solchen mit Regen nur wenige Zehntel K Unterschied. Ein Vergleich zeigte, daß sich auch die 30 cm-Werte kaum von denen in tieferen Schichten unterschieden.

Der März ist in Neuguinea noch Teil der sich dann abschwächenden Regenzeit. Diese war nach Einschätzung der Ortsansässigen im betreffenden Jahr noch besonders naß ausgefallen. Zum Beispiel wurden vom 1. Oktober 81 bis zum 22. März 82 an der privaten Niederschlagsstation der

Mission in Keglsugl (2450 m) an 156 (von 173) Tagen insgesamt 1730 mm Regen gemessen. Die längste Regenperiode während dieser Zeit war 43 Tage lang; in ihr gab es keinen niederschlagsfreien Tag! Ähnliche Verhältnisse herrschten auch im mittleren Hochland und während der Messungen in der Nähe von Port Moresby. Diese Umstände mit stark eingeschränkter Sonnenscheindauer erlaubten keine großen Amplituden der Bodentemperaturen, so daß auch in den obersten Bodenschichten, die sonst einen ausgeprägten Tagesgang aufweisen müßten, nur geringe Temperaturschwankungen möglich waren.

Das Strahlungsklima der Bergländer Neuguineas ist durch viel geringeren Umsatz und durch noch geringere Tages- und Jahresschwankung als in anderen äquatorialen Gebirgen gekennzeichnet. Dies bestätigen mehrjährige frühere Feldbeobachtungen anderer Autoren, zusammengestellt in HNATIUK et al. (1976).

Die Klimate der drei untersuchten Gebirge sind wie folgt miteinander zu vergleichen: Die Virunga-Vulkane Ruandas sind in ihrem Charakter einzuordnen zwischen das ausgeprägte ozeanische Klima Neuguineas und das ihm fast gleiche des Ruwenzori in Zentralafrika einerseits und das deutlich kontinentalere Klima der ostafrikanischen Gipfel Mt. Kenia und Kilimandscharo andererseits. Die Sierra Nevada in Nordkolumbien dürfte etwas kontinentaler sein als die Gipfel in Ruanda und damit die Bergregion mit dem stärksten Strahlungsumsatz darstellen, was sich auch in den entsprechend großen Temperaturschwankungen niederschlägt.

Die Abbildung zeigt die Profile der in 50 cm Tiefe gemessenen Bodentemperaturen aus den drei Erdteilräumen. An der Temperaturkurve Neuguineas erkennt man bei 2600 m ü. M. den Knick im Temperaturgradienten, von wo ab es bis mindestens zur Waldgrenze, die hier bis 3800 m reichen kann, deutlich schneller kälter wird als weiter unten. Denn dies ist ebenso auffällig wie ungewöhnlich: Unterhalb 2600 m nimmt die Temperatur nach oben wiederum sehr wenig ab. Der Gradient (lapse rate) liegt mit 4,6 K auf 1000 m noch unter der 5 K-Grenze, die in der Atmosphäre über größere Höhenunterschiede sonst nirgendwo erreicht wird. Die Autoren von „The Climate of Mt. Wilhelm“ (1976) geben für den Hochgebirgsbereich der großen Insel Werte von 0,6 bis 0,55 K pro 100 m an, andere Wissenschaftler (BOURKE 1982, HUMPHREYS 1981) für alle Höhen Durchschnittswerte von 0,52 und 0,53 K/100 m. Das sind für tropische Verhältnisse sehr niedrige Werte, aber selbst diese liegen noch über dem Gradienten der mittleren Bodentemperatur, wie er hier im März 1982 vom Verf. gefunden wurde.

Die zunächst nur zögernde Temperaturabnahme nach oben ist sicher die Folge der in Neuguinea so dominierenden Wärmezufuhr durch Kondensationsvorgänge und Regenwasser. Sie führen dem Boden soviel Wärme zu, daß die Gleichgewichtstemperatur hier höher liegt als in fast allen anderen tropischen Hochgebirgen. Das zeigt sich u. a. deutlich an den sowohl in Ruanda als auch in Kolumbien ab mindestens 1500 m aufwärts sehr viel niedrigeren Bodentemperaturen.

Die recht niedrigen Temperaturen in Meereshöhe und noch bis 2000 m liegen andererseits unter den Werten, die andere Autoren für tropische Tieflagen angeben. HUMPHREYS (1981) nennt speziell für die Meereshöhen von Papua Jahresmittelwerte von 30 °C in 60 cm Tiefe. Diese Zahlen sind um 4 K höher als die vom Verfasser zuletzt gemessenen. Sofern lokale Besonderheiten als Ursache ausscheiden, müßte der

Einfluß der andersartigen Witterung während der Regenzeit zur starken Abkühlung geführt haben. In den höheren Lagen dagegen stimmen die Werte von HUMPHREYS und vom Verf. (7,5 zu 8°C in 3400 m) gut überein. Der Gradient zwischen 0 und 4000 m würde nach HUMPHREYS' Werten 0,56 K/100 m erreichen und damit über dem von Verf. im März 1982 gefundenen Wert von 0,46 liegen. Im Mittel über die ganze Schicht allerdings deckt er sich mit 0,55 zu 0,56 sehr genau mit HUMPHREYS' Wert.

Für die über 2600 m stärker abnehmende Temperatur in Neuguinea fehlt noch eine schlüssige Erklärung. In Kolumbien käme für die Inversion ab 3100 m – als zweiter Besonderheit im großräumigen Gradientenvergleich – vielleicht das Zusammenwirken von verstärkter Einstrahlung und der Zufuhr von fühlbarer Wärme durch den ständig wehenden und oberhalb der Passatinversion (ca. 1200 m Höhe) relativ warmen Nordostpassat in Frage. Denn die recht dünne Pflanzendecke isoliert nur wenig Energiezufuhr von außen in den Boden.

### Zusammenfassung

Im Januar 1980 wurden im Norden und Nordwesten Ruandas, im Februar 1981 im Norden Kolumbiens und im März 1982 in Neuguinea Erdbodentemperaturen in verschiedenen Tiefen gemessen. Dabei ergab sich für den bewachsenen Boden folgendes:

1. Die mittlere tägliche Temperaturspanne zwischen den geringeren und größeren Bodentiefen war in Ruanda (ca. 2° S) mit Werten zwischen 0 und 3,5 Kelvin recht klein und scheint von der Höhe nicht nennenswert abzuhängen. In Kolumbien dagegen (ca. 11° N) nimmt sie von Meereshöhe mit Werten um 1 Kelvin auf das etwa Fünffache in 3500 Metern zu. In Neuguinea (6–10° S) war sie mit Differenzen von ± 1 K am kleinsten, so daß man dort von annähernder Isothermie sprechen kann.
2. Die Tagesamplitude der Temperaturen in den obersten Bodenschichten wird in Ruanda und Kolumbien mit der Höhe größer. Dies verhält sich entgegengesetzt zu der Regel, daß das Klima mit der Höhe ozeanischer, d. h. daß die tägliche Temperaturamplitude kleiner wird. In Neuguinea konnte praktisch kein Tagesgang festgestellt werden.
3. Die Temperatur nimmt in der schwankungsfreien Bodentiefe von 50 cm im östlichen Zentralafrika alle 100 m im Mittel um 0,61 K ab, im nördlichsten Andenabschnitt im Bereich und während des winterlichen Nordostpassats um 0,64 K pro 100 m. In Neuguinea ergab sich ein deutlich „geknickter“ Gradient: Bis 2600 Meter errechnet sich der erstaunlich niedrige Wert von 0,46 K, oberhalb davon jedoch von 0,75 K, was im Mittel von

0–4000 m 0,55 K ergibt. Der erstgenannte Wert von 0,46 ist wahrscheinlich einer der niedrigsten auf der Erde.

4. Die Erdbodentemperaturen hängen sehr deutlich von der darüber befindlichen Vegetation ab: Unter der dichtesten Pflanzendecke ist es stets am kältesten.
5. In zwei Gebieten ist je eine Besonderheit auffällig: In der Sierra Nevada scheint die Temperatur oberhalb von 3100 m, also etwa mit dem Ende des Baumwuchses, zunächst noch zuzunehmen; in Neuguinea oberhalb von 2600 m (noch weit vor der Waldgrenze) dagegen noch stärker abzunehmen, und zwar gleichmäßig über die Waldgrenze zwischen 3200 und 3600 m hinweg.

### Literatur

- BOURKE, R. J.: Vorl. Mitteilung über Temperaturgradienten in Papua-Neuguinea. Dep. of Primary Industry, Aiyura, E.H.P., 1982 (unveröffentlicht).
- FRÖHLICH, W., WILLER, M.: Bodentemperatur und obere Waldgrenze. Vorl. Ber. üb. Unters. an d. Hochbergen Ostafrikas. In: Die Erde 1977/4, S. 347–353.
- HNATIUK, R. J., SMITH, J. M. B., McVEAN, D. N.: The Climate of Mt. Wilhelm. Mt. Wilhelm Studies 2, Research School of Pacific Studies, Dep. of Biogeography & Geomorphology, Publ. BG/4. The Australian National University, Canberra 1976.
- HUMPHREYS, G. S.: 1. Lapse rates for Papua New Guinea; 2. Soil temperature data for Papua New Guinea. Simbu Land Use Project, Dep. of Primary Industry, Kundiawa, Simbu, PNG 1981 (unveröffentlicht).
- LAUER, W.: Bericht der Kommission für Erdwiss. Forschung. In: Jahrbuch der Akademie der Wiss. Mainz 1977, S. 125/126; 1979, S. 123; 1981, S. 158–161; 1982, S. 136.
- : Zur Ökoklimatologie der Kallawaya-Region (Bolivien). In: Erdkunde 36, 1982, S. 223–247.
- LAUER, W., KLAUS, D.: Geoecological investigations of the timberline of Pico de Orizaba, Mexico. In: Arctic and Alpine Research 7, 1975, S. 315–330.
- 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 35, 1981, S. 248–263.