

Auffällig ist bei dem Vergleich der ariden Räume, daß die südafrikanischen Trockengebiete wegen ihrer Höhenlage weit kühler sind als die der Sahara/Sahelzone. Dem entspricht in Südafrika der besondere Vegetationstyp der Miombo- und Mopanewälder.

Die aridesten und heißesten Gebiete Afrikas liegen in der südlichen Zentralsahara sowie in den Küstenregionen Äthiopiens. Die humidesten Räume sind im Inneren des Kongobeckens sowie an der westafrikanischen Küste gelegen, wo die äquatorialen Westwinde auflandig wehen. Von diesen Zentren der Humidität nimmt nach Norden und Süden die Aridität zu. Die Trockengürtel scheiden die feuchteren tropischen Klimagebiete von den feuchteren subtropischen. Lediglich im Osten Südafrikas verzahnen sie sich.

Die mediterranen Klimagebiete des Nordens zeitigen zur Küste hin eine höhere Anzahl humider Monate. Die Gebirge ragen wie im subtropischen Südafrika als Inseln der Humidität aus relativ trockenen Ebenen auf.

Am deutlichsten ist die zonale Anordnung der Klimagebiete, die einen Großteil des Kartenbildes prägt, im östlichen Afrika abgewandelt. Das äthiopische Hochland sowie die Gebirge Kenias, Ugandas und Tanzanias bedingen mit ihrer relativ hohen Humidität bei verhältnismäßig kühlen Jahresmitteltemperaturen eine zellenartige Struktur der Klimagebiete. Die Gebirge stellen sich als Feuchtereservoire der Ebenen dar.

Auf Madagaskar führt der NE/SW streichende Hauptzug des zentralen Gebirges zu einer eher meridionalen Anordnung der Klimagebiete mit einem feuchteren Osten und einem trockeneren Westen. Wie im östlichen Südafrika sind dafür die aus den subtropischen Hochdruckzellen resultierenden östlichen regenbürtigen Passatwinde verantwortlich. Hinsichtlich der Zusammenhänge der allgemeinen Zirkulationsdynamik verweisen wir auf den Beitrag der Autoren in *Erdkunde*, 33, 1979.

Der vorliegenden Klimakarte sollen in gleicher Konzeption Klimakarten der übrigen Kontinente in unregelmäßigen Abständen folgen unter dem Gesamtkonzept einer Klassifizierung der Klimate der Erde.

Literatur

- FRANKENBERG, P.: Floreogeographische Untersuchungen im Raume der Sahara. – Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Differenzierung des nordafrikanischen Trockenraumes. *Bonner Geogr. Abh.*, 58, Bonn 1978.
- HENNING, I. und HENNING, D.: Kontinent-Karten der potentiellen Landverdunstung, berechnet mit dem Penman-Ansatz. *Meteorol. Rdsch.*, 33, 1980, S. 18–30.
- LAUER, W.: Hygrische Klimate und Vegetationszonen der Tropen mit bes. Berücksichtigung Ostafrikas. *Erdkunde*, 5, 1951, S. 284–293.
- : Humide und aride Jahreszeiten in Afrika und Südamerika und ihre Beziehung zu den Vegetationsgürteln. *Bonner Geogr. Abh.*, 9, 1952, S. 15–98.
- : Vom Wesen der Tropen. Klimaökologische Studien zum Inhalt und zur Abgrenzung eines irdischen Landschaftsgürtels. *Akad. d. Wiss. u. d. Lit. Mainz, Math. Naturwiss. Kl.*, H. 3, Wiesbaden 1975.
- : Ökologische Klimatypen am Ostabfall der mexikanischen Meseta. *Erdkunde*, 32, 1978, S. 101–110.
- LAUER, W. und FRANKENBERG, P.: Zum Problem der Tropengrenze in der Sahara. *Erdkunde*, 31, 1977, S. 1–15.
- : Untersuchungen zur Ökoklimatologie des östlichen Mexiko. Erläuterungen zu einer Klimakarte 1:500 000. *Colloquium Geographicum*, 13, Bonn, 1978, S. 1–134.
- : Der Jahresgang der Trockengrenze in Afrika. *Erdkunde*, 34, 1979, S. 249–257.
- : Untersuchungen zur Humidität und Aridität von Afrika. – Das Konzept einer potentiellen Landschaftsverdunstung. *Bonner Geogr. Abh.*, 66, Bonn 1981.
- LEBEDEV, A. N.: The climate of Afrika. Pt. I, Jerusalem 1970.
- PAFFEN, KH.: Das Verhältnis der tages- zur jahreszeitlichen Temperaturschwankung. *Erdkunde*, 21, 1967, S. 94–111.
- PENMAN, H. L.: Vegetation and Hydrology. *Techn. Comm. No 53, Commonwealth Bureau of Soil Science*, 1, Harpenden, 1963.
- THORNTHWAITE, C. W.: An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Review*, 38, 1948, S. 55–91.
- TROLL, C.: Thermische Klimatypen der Erde. *Pet. Geogr. Mitt.*, Jg. 1943.
- : Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. – Mit einer farbigen Karte von C. TROLL und KH. PAFFEN. *Erdkunde*, 18, 1964, S. 5–28.
- WISSMANN, H. v.: Pflanzenklimatische Grenzen der warmen Tropen. *Erdkunde*, 2, 1948, S. 81–92.

ZUR THERMISCH-HYGRISCHEN GLIEDERUNG DES MOUNT KENYA*)

Mit 7 Abbildungen, 1 Farbluftbild und 1 Tabelle

MATTHIAS WINIGER

Summary: Causes and effects of the thermo-hygric differentiation of Mt. Kenya

Soil temperatures (annual means in 50–70 cm depth) and mean annual rainfall data are the elements of the thermal-hygric zoning of Mt. Kenya, which is discussed with reference to its climatic causes as well as its ecological consequences.

Soil temperatures along the profile from the lowlands to the summit, show – depending on the general exposure and altitude – distinct zones of excesses or deficiencies respectively: temperature

depressions coincide with zones of frequent and dense cloud cover (producing high annual amounts of rainfall), whereas relatively

*) Die Feldarbeiten wurden finanziert durch ein Forschungsreisestipendium der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG). Unterstützung im Felde erhielt ich durch H. SPECK, R. VOLZ und Prof. MESSERLI, der auch das Manuskript kritisch kommentierte. Die Reinzeichnung der Figuren fertigten R. RICKLI und M. BICHEL. Allen sei an dieser Stelle gedankt.

high temperatures occur in areas with high solar irradiation and only little rain. Furthermore, there is clear evidence of the dominant influence of the atmospheric circulation and its local effects (dominant air currents of the free atmosphere, daily and annual course of cloudiness and local wind systems).

Altitudinal belts of morphodynamic processes, the amount of vegetation coverage and vegetation itself are determined to a great extent – but not exclusively – by the mean thermal and hygric conditions. Additional local factors may further differentiate the ecological patterns (topography, soils, annual amount of frost changes, seasonal distribution of precipitation). Altogether it can be concluded that areas above 3500–4000 m are predominantly arranged by thermal limits, whereas the lower parts are equally influenced by temperature and humidity.

In this contribution the following altitudinal belts are differentiated:

1. Nival zone with soil temperatures (T_S) $\leq 1^\circ\text{C}$. Seasonal frost or even permafrost (?) could be found above 4800 m.
2. Periglacial belt (vegetation coverage $< 50\%$): $T_S = 1$ to $5,5^\circ\text{C}$, 250–300 days of frost change per year.
3. A fro-alpine belt with distinct vertical overlap of the different ecological units $T_S = 5,5$ – $8,5^\circ\text{C}$. In areas with annual precipitations of > 1250 – 1500 mm the tussock grassland forms proper moorlands.
4. A fro-montane belt: forests between $T_S = 8,5$ – 18°C and with precipitation > 900 mm; included a thermally well defined bamboo-zone at $T_S = 12$ – 14°C and rainfall > 1200 mm. In areas with less than 900 mm annual rainfall grass- and bushland is predominant.

The upper timber line concentrates at soil temperatures of $T_S = 8$ – 9°C (extremes at 7, resp. 11°C), whereas other authors mention $T_S = 7^\circ\text{C}$ as a typical value. The annual number of frost changes is estimated to be approximately 100. The lower timber line is the result of the lack of humidity or human activities.

A comparison of thermal conditions at the upper timber line in tropical high mountain areas of East Africa, Central and South America and Borneo show their similarity: with the exceptions of Mt. Cameroon and Pico de Orizaba timber lines are all limited within the same thermal range as on Mt. Kenya.

This contribution ends with reference to possible interpretations of the thermal-hygric data related to climato-ecological changes.

Mit Hilfe von Bodentemperaturen und Niederschlagsdaten wird die klimatische Gliederung eines tropischen Hochgebirges am Beispiel des Mount Kenya erarbeitet und im Hinblick auf Ursachen sowie ökologische und geomorphologische Auswirkungen diskutiert.

I. Das Untersuchungsgebiet

Der Mt. Kenya (5200 m) – direkt unter dem Äquator gelegen – weist physiographische Verhältnisse auf, die in ihrer Einfachheit die klima-ökologischen Zusammenhänge vergleichsweise durchschaubar werden lassen. Auf der Satelliten-Aufnahme vom 30. 1. 1973 (Photo 1) lassen sich die wesentlichen Gliederungselemente klar gegeneinander abgrenzen:

1. Der flache, oberhalb der Waldgrenze bereits stark erodierte Vulkankegel. Die radial ausfächernden Täler sind in den höheren Lagen glazial überarbeitet.

2. Die umliegende Fußzone, die ihrerseits in verschieden hoch gelegene Teilflächen gegliedert ist. Namentlich das westliche und nordwestliche Vorland liegt deutlich höher (1600–2000 m) als die übrigen Sektoren (1000–1800 m).

Die Vegetationshöhenstufen des Berges weisen eine Asymmetrie auf, die am markantesten in der Waldstufe in Erscheinung tritt. Sie ist klimatisch bedingt und wird in Kap. V. 2. näher zu diskutieren sein, ebenso wie die vertikale Abfolge von Wald, Moorland, afroalpiner Stufe, Frostschutt und nivaler Stufe.

Agrarische Nutzung und Bevölkerungsverteilung des Bergfußbereiches lassen sich vereinfachend in zwei Teilräume gliedern mit klimatisch, aber auch historisch völlig voneinander abweichenden Voraussetzungen:

1. Der E-Sektor (von NE bis SW), rel. feucht, wird in kleinflächigen, dicht belegten Garten- und Ackerbaubetrieben genutzt (im LANDSAT-Bild des Photos 1 als homogene, gleichgetönte Fläche).
2. Der W-Sektor (von SW bis NE), z. T. sehr trocken, ist überwiegend extensiver Weidewirtschaft vorbehalten, mit großflächigem Getreideanbau in Bergfußnähe. Es sind dies Teile der ehemaligen „White Highlands“.

Gegenwärtig erfolgt eine Nutzungsintensivierung in allen Räumen, wobei namentlich die untere Waldgrenze unter starken Druck geraten ist und sich Kleinbetriebe in großer Zahl in den ackerbaulichen Grenzertragsräumen (Trockengebiete) ansiedeln. In beiden Fällen müssen hohe ökologische und ökonomische Risiken eingegangen werden.

II. Probleme einer klimatischen Raumgliederung

Im thermischen Tages- und hygrischen Jahreszeitenklima der Tropen ist eine klimatische Raumgliederung dadurch charakterisiert, daß thermische Unterschiede vorwiegend in der Höhenabstufung auftreten, während der Feuchtigkeitshaushalt räumlich (horizontal, vertikal) wie zeitlich (Trocken-, Feuchtzeiten) außerordentlich stark variieren kann. Die räumliche Homogenität des Temperaturfeldes ist häufig so weitgehend, daß die mittleren Temperaturwerte für einen bestimmten Geländepunkt mit hinreichender Genauigkeit errechnet werden können. So zeigte GRIFFITHS (zit. in BROWN, COCHEME 1969, 97) für Ostafrika, daß unter Anwendung eines Gradienten von $0,6^\circ\text{C}/100$ m, die auf Meeressniveau reduzierten Jahresmittelwerte der Lufttemperatur auch weit auseinander liegender Stationen um höchstens $3,5^\circ\text{C}$ voneinander abweichen, wobei Gebiete westlich des Mount Kenya im Mittel $1,7^\circ\text{C}$ zu tief, die südöstlichen Teile Tanzanias um den gleichen Betrag zu hoch bewertet werden. Völlig anders liegen die Verhältnisse beim Niederschlag, wo namentlich im Hinblick auf die jahreszeitliche Gliederung und längerfristigen Variabilitäten entsprechend lange Reihen eines räumlichen rel. dichten Meßnetzes benötigt werden.

Die meisten Klimatypisierungen der Tropen weisen denn auch vergleichsweise einfache thermische Grenzziehungen auf, unter Verwendung von Temperaturmittelwerten und -minima. Ökologisch besonders entscheidend sind dabei die

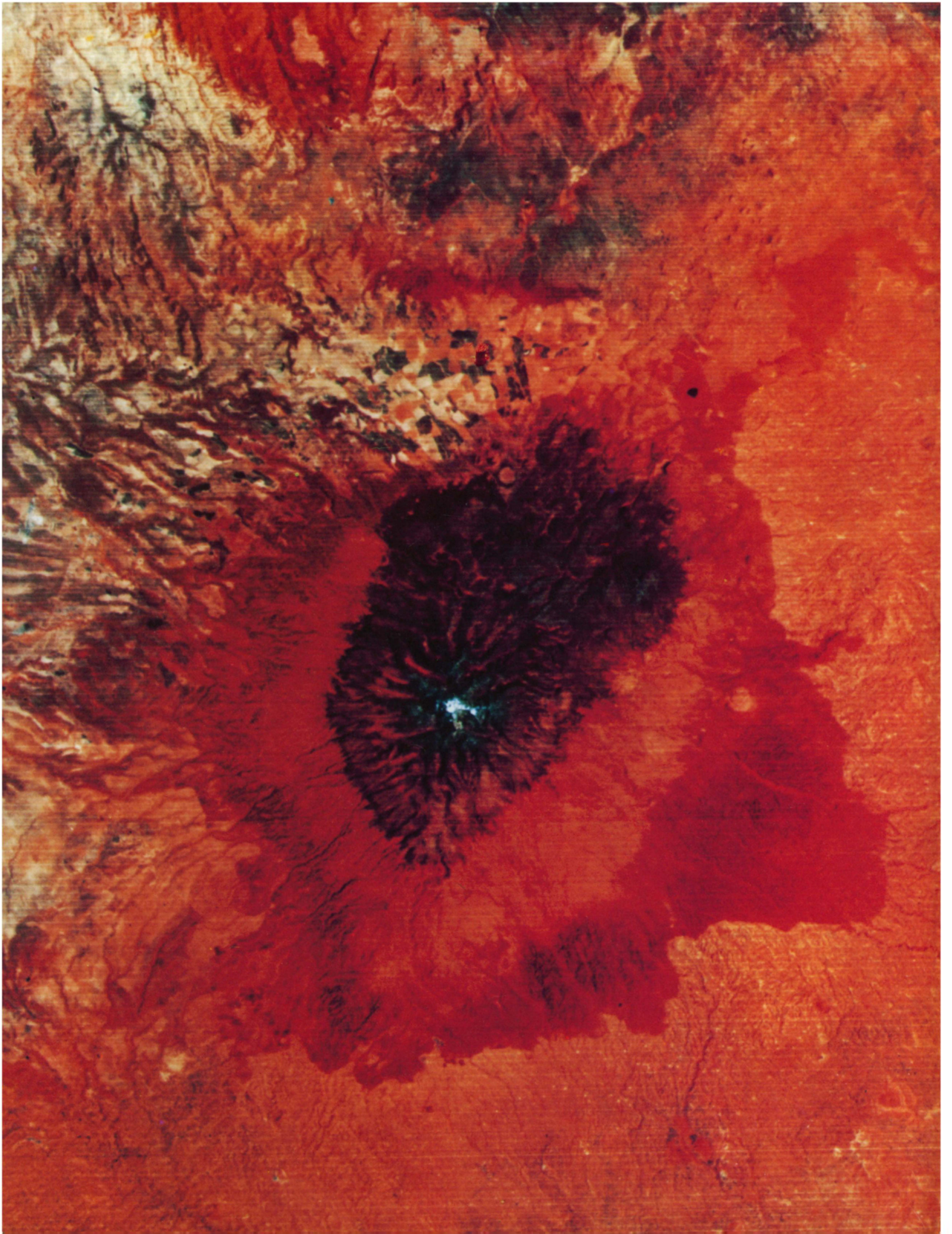


Photo 1: Mt. Kenya, Ausschnittsvergrößerung einer LANDSAT-Falschfarbenaufnahme vom 30. 1. 1973 (NASA-E-1191-07115). Im Bild ist der Vulkankegel als große, kreisförmige Struktur erkennbar. Seine afro-montanen und -alpinen Vegetationshöhenstufen sind in Abb. 1 ausgedehnt.

Die umliegenden Flachländer scheiden sich in eine rel. feuchte S- und E-Seite mit intensiver, kleinparzellierter Nutzung durch Kleinbauern (homogene hellrote Flächen am unteren und rechten Bildrand), sowie eine semiaride W- und N-Seite, mit extensiver Weidewirtschaft (streifige Strukturen im linken Bildrand) und großparzellierte Getreideanbau am Bergfuß (rechteckige Strukturen in oberer Bildmitte)

Mt. Kenya: enlargement of a section of a LANDSAT-false colour scene taken on 30. 1. 1973 (NASA-E-1191-07115). In the picture the volcanic cone is recognisable as a large, circular structure. Its afro-montane and afro-alpine vegetation-belts are separated in fig. 1. The surrounding flat country is divided into relatively humid southern and eastern sides, with intensive cultivation in small plots by small farmers (homogenous light red areas at the lower and right hand edges of the picture), together with a semi-arid western and northern side with extensive pasture lands (striped structure on the left of the picture) and grain cultivation in large plots at the foot of the mountain (right-angled structure in the upper centre)

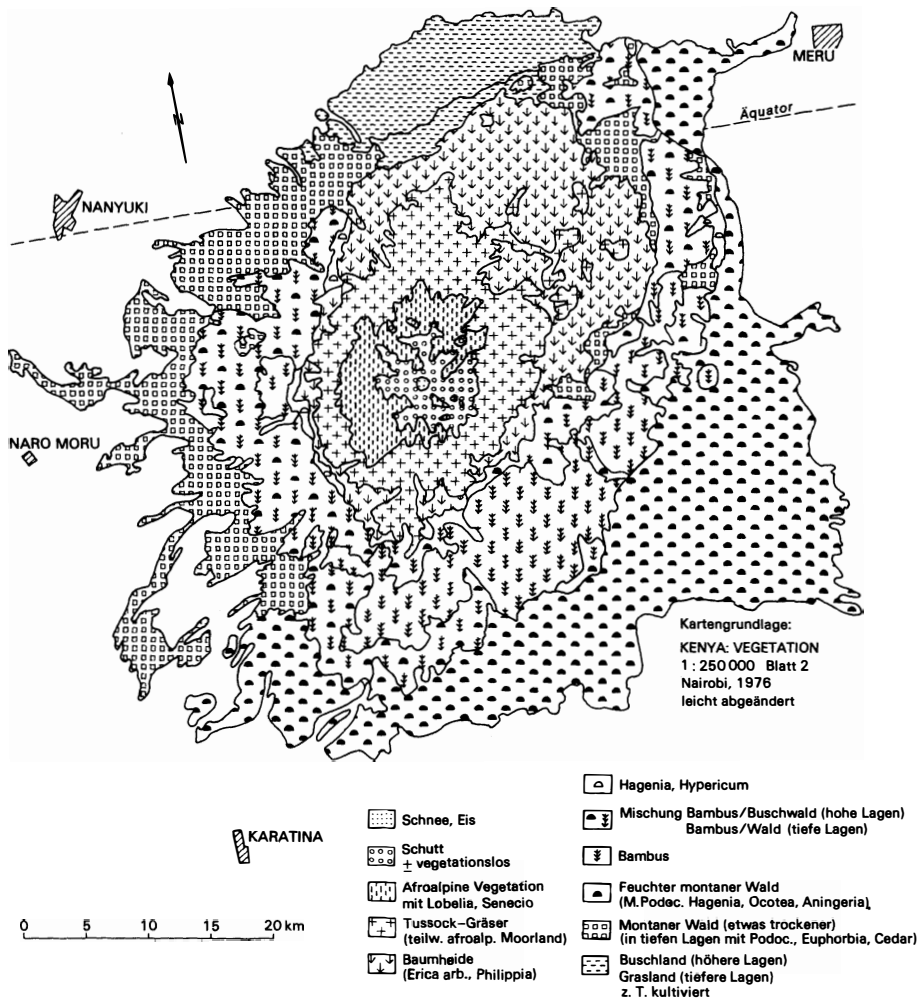


Abb. 1: Mt. Kenya: Vegetation der afro-montanen und -alpinen Höhenstufen
Mt. Kenya: vegetation of afro-montane and afro-alpine belts

absolute Frostgrenze (bei etwa 16–18 °C Jahresmittelwert der Lufttemperatur) und die auch im Landschaftsbild bedeutsame Region regelmäßig auftretender Fröste, die durch die obere Waldgrenze markiert wird (LAUER, 1975, 29).

Wesentlich differenzierter werden dagegen meist die hygrischen Bedingungen erfaßt. So verwendet JAETZOLD (1977) in seiner agrarklimatisch ausgerichteten Gliederung Ostafrikas ein fein abgestuftes Spektrum hygrischer Typen und Subtypen, je nach den im Jahresablauf unterschiedlich auftretenden feuchten und trockenen Monaten. Diese zeitlich und quantitativ starke Aufgliederung der Niederschlagsdaten verlangt denn auch die oben erwähnten langen Beobachtungsreihen aus einem im Vergleich zur Temperaturbestimmung wesentlich dichteren Meßnetz.

In Gebirgsräumen mit ihrem kleingekammerten Relief und entsprechender Ausgestaltung des Vegetationsbildes sind Klimadaten meist nur rudimentär vorhanden und beschränken sich häufig auf die Dauer von Feldmeßkampagnen. Zu den Ausnahmen gehört der *Mount Kenya*, der über ein nach Expositionen und Höhenstufen gut ausgebautes Netz von Niederschlagstotalisatoren verfügt, das in den ersten Betriebsjahren (zirka 1959–1962) mit einiger Regelmäßigkeit, seither allerdings nur noch sporadisch betreut wurde. Wiederholt sind an verschiedenen Stellen Luft-, selten auch Bodentemperaturen erhoben worden, ergänzt durch Messungen und Beobachtungen weiterer Klimaelemente. Insgesamt verfügen wir über vergleichsweise gute klimatische Kenntnisse dieses ostafrikanischen Hochgebirgsraumes (SCHNELL et al, 1978, 1977; DAVIES et al, 1977; SPOENEMANN, 1977; HASTENRATH, 1973; BRINKMAN, WURZEL, JAETZOLD, 1968; LOEFFLER, 1968; COE, 1967; THOMPSON, 1966).

Vor diesem Hintergrund soll nun im folgenden versucht werden, die Bodentemperatur als klimatisches Gliederungselement einzubeziehen. Sie ist einerseits eine Größe, die durch mehrere Parameter (Strahlung, Lufttemperatur, Bodenfeuchte, Vegetationsdecke, Relief, Bodenart etc.) bestimmt wird, zum andern aber problemlos und mit geringem Aufwand gemessen werden kann. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, ein vergleichsweise dichtes Netz momentaner oder langzeitiger Punktmessungen über ein Gebiet zu legen.

III. Die Bodentemperatur

WALTER (1960) und WALTER, MEDINA (1969) haben der an sich schon seit langem bekannten Tatsache systematisch Beachtung geschenkt, daß im thermischen Tageszeitenklima

der Tropen in der oberflächennahen Bodenschicht praktisch nur tageszeitliche Temperaturschwankungen auftreten, die jahreszeitlich lediglich geringfügig modifiziert werden. Somit ist bereits in geringen Bodentiefen die mittlere Jahrestemperatur meßbar, die nach WALTER (1960) in enger Relation zur Jahresmitteltemperatur der darüber liegenden Luftschicht steht. An schattigen Standorten (Wald) wird Temperaturkonstanz in 30 cm Tiefe erreicht, wobei hier Bodentemperatur $T_B =$ Lufttemperatur T_L (Jahresmittelwert) gilt. Für besonnte Standorte gibt WALTER die entsprechende Tiefe mit 60 cm an, wobei aber hier der Boden gegenüber der Luft (Jahresmittelwert) um 3 °C höher temperiert ist. Im Zusammenhang mit der Höhenlage der tropischen Waldgrenze ist dieser Sachverhalt bereits mehrfach herangezogen worden, so von WALTER, MEDINA (1969), LAUER, KLAUS (1975), FROELICH, WILLER (1977), wobei sowohl für Ostafrika, wie für die feuchttropischen Anden mehrfach 7–8 °C Bodentemperatur an der oberen Waldgrenze gemessen worden sind. Nach WALTER (1960) sind es namentlich pflanzenphysiologische Prozesse im Wurzelbereich, die bei den oben angegebenen Temperaturwerten ihre Begrenzung finden und damit auch ein Vordringen von Wäldern in höher gelegene, kältere Stufen ausschließen. In Abschnitt V. 2 werden wir auf das Problem der Waldgrenze zurückkommen.

Auf der Basis dieser Vorkenntnisse wurde nun versucht, die Bodentemperatur als thermisches Gliederungselement eines ganzen tropischen Gebirgsraumes einzusetzen. In mehreren Feldmeßkampagnen 1976–1978, mit ergänzenden Einzelmessungen 1979, wurden in allen Höhenlagen und Expositionen des Mt. Kenya Bodentemperaturen erhoben.

Die *methodischen Aspekte* dieser Untersuchungen sind an anderer Stelle diskutiert worden (WINIGER 1979), so daß wir uns hier mit einer Zusammenfassung begnügen können:

- Bodentemperaturen sind an fest eingerichteten Meßstellen (in verschiedenen Tiefen vergrabene Platinsonden) periodisch gemessen worden. Daraus ließ sich ableiten, daß geringe Schwankungen von Jahr zu Jahr auch noch in 60 cm Tiefe auftreten können, vor allem in nicht-bewaldeten Gebieten. Eine Meßtiefe von 70 cm scheint zumindest im freien, unbeschatteten Gelände zweckmäßig, während im Wald 50 cm ausreichen sollten.
- An nicht fest eingerichteten Meßstellen wurde die Temperatur mit Thermistor NTC-Elementen (Typ Metrast P-60) in ausgehobenen Schächten bestimmt.
- Die Bodentemperatur ist abhängig von der Strahlung, Lufttemperatur, Topographie (Exposition, Hangneigung, Meereshöhe), Bodenart, Bodenfeuchtigkeit, Vege-

Tabelle 1: Schwankungen der Bodentemperaturen an zwei festen Meßstellen am Mt. Kenya (Minimal-, Maximalwerte pro Monat in 70 cm Tiefe)

	Sept. 76	Dez. 76	Jan. 77	Feb. 77	Aug. 78	Sept. 78	Sept. 79
Meßstelle I: W-Exposition Waldgrenze Naro Moru Track, 3350 m, permanent feucht	6,4/7,0	6,2/6,8	6,5/6,9	6,3/7,0	7,1/7,4	7,0/7,1	7,0
Meßstelle II: N-Exposition Timau Track, 3350 m, wechselfeucht	9,5/9,8	9,6	9,0/9,7	–	9,0/10,9	9,0/9,5	–

tationsbedeckung etc., insgesamt also von einer großen Zahl von Randbedingungen, was zur Folge hat, daß auch kleinräumig recht große Schwankungen auftreten können. Für integrierende Raumgliederungen sollten demzufolge nach Möglichkeit Normmeßflächen verwendet werden (z. B. ebene, rasenbedeckte Flächen), während andererseits differenzierende Messungen der Erfassung des lokalen Variationsspektrums dienen. Beispiele solcher kleinräumiger Schwankungen und ihre Ursachen sind in Abb. 2 zusammengestellt.

- d) Die häufig in Betracht gezogene Relation zwischen der konstanten Bodentemperatur T_B und der Jahresmitteltemperatur der darüberliegenden Luftschicht (in 2 m Höhe) $T_{L,2m}$ kann größenordnungsmäßig und in guter Übereinstimmung mit WALTER (1960) wie folgt angegeben werden (vgl. auch Kap. IV. 1.):
- für *besonnte, trockene* Standorte:
 $T_{L,2m} = T_B - 3^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$
 - für *schattige, rel. feuchte* Standorte:
 $T_{L,2m} = T_B - 0,5^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$
- e) Die Aussage, daß mit den so definierten Messungen das *mehrfährige Temperaturmittel* erfasst wird, muß wie folgt

eingeschränkt werden: für dauernd feuchte Gebiete (Moorland, Regen- und Nebelwald) dürfte dies eher zutreffen, als für wechselfeuchte Standorte, wo je nach Feuchtigkeitsverhältnissen größere Schwankungen auftreten können, die über die Messungenauigkeiten hinausgehen. In Tab. 1 wird dieser Sachverhalt besonders augenfällig dokumentiert am Beispiel des August 1978, wo als Folge eines sehr starken Feuchtigkeitswechsels ein Temperaturabfall um nahezu 2°C zu verzeichnen war (Messstelle II: Timau Track = Nordexposition des Berges).

IV. Die thermisch-hygrische Gliederung des Mt. Kenya

1. Mittlerer Bodentemperaturverlauf

Fassen wir die Bodentemperaturmessungen aller Expositionen in einem einzigen gemittelten Höhenprofil zusammen (Abb. 3).

Abweichend von GRIFFITHS' (1972, 319) Lufttemperaturberechnungen (in Abb. 3 mit ++++ eingetragen) ergibt sich ein nicht-lineares Höhenprofil, das in drei deutliche Stufen gegliedert ist:

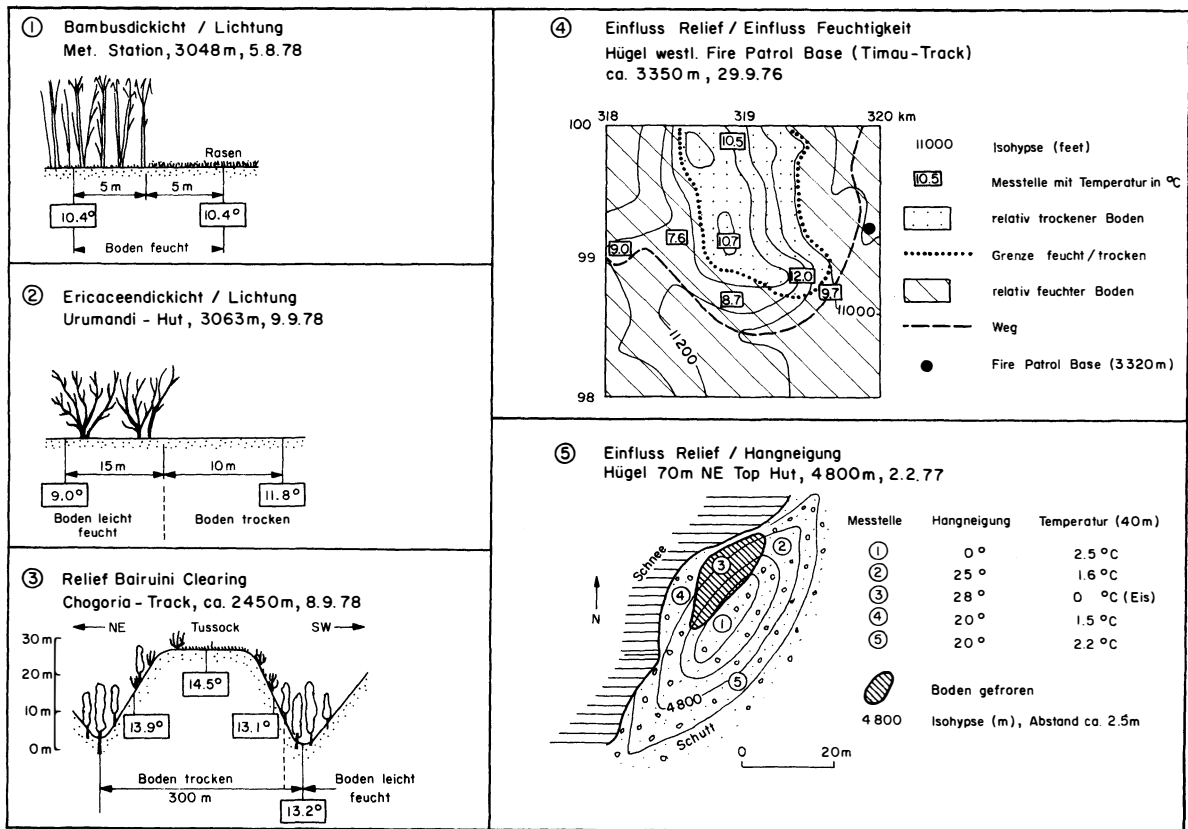


Abb. 2: Kleinräumig auftretende Differenzen konstanter Bodentemperaturen als Funktion verschiedener Einflußgrößen (WINIGER, 1979, 133)

Differences in constant soil temperatures occurring over small areas as a function of various influencing factors (WINIGER, 1979, 133)

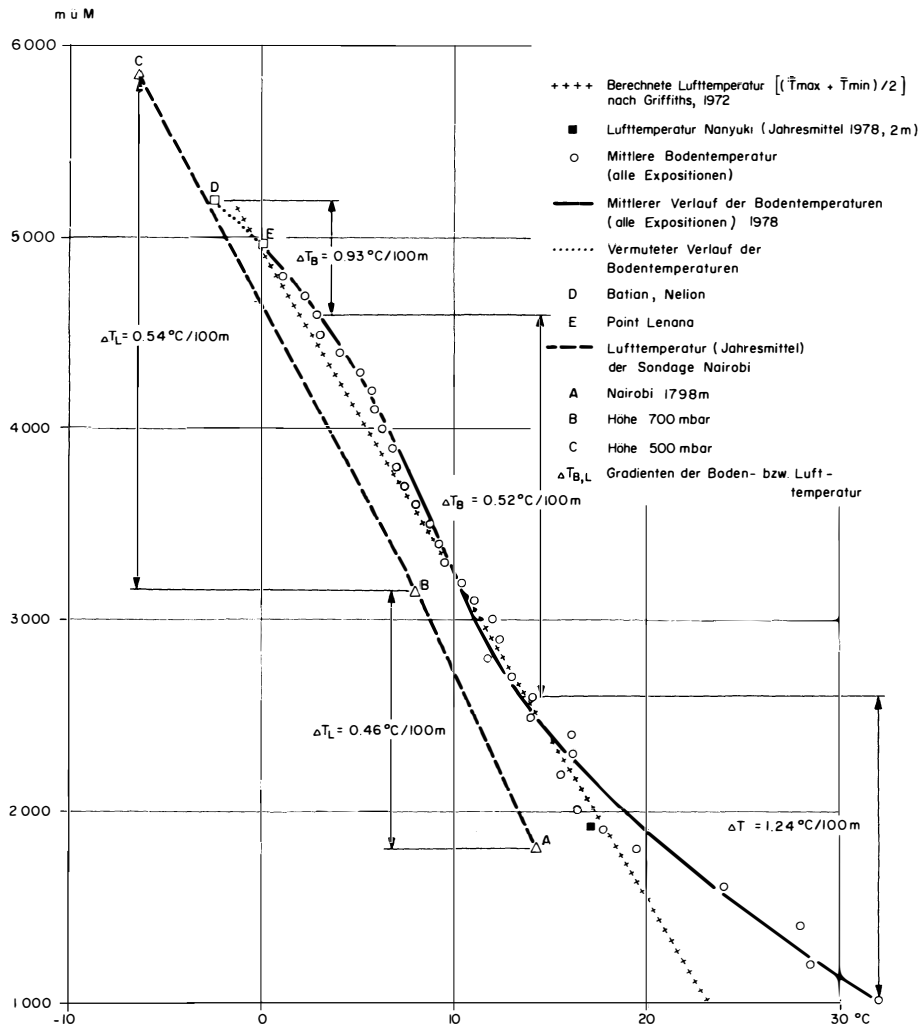


Abb. 3: Vergleich der Temperatur der freien Atmosphäre (Sondage Nairobi), berechneter Lufttemperaturwerte (2 m, nach GRIFFITHS, 1972) und über alle Expositionen gemittelte Bodentemperaturwerte im Höhenprofil des Mt. Kenya (Ergänzt nach WINIGER, 1979, 139)
Comparison of temperature of the free atmosphere (Sondage, Nairobi), calculated air temperature values (2 m., after GRIFFITHS, 1972) and soil temperature values (mean value of all exposures in Mt. Kenya's altitudinal profile supplemented after WINIGER, 1979, 139)

- Die Bergfußzone mit dem Übergang vom waldfreien (wechselfeuchten) Flachland zum bewaldeten (immerfeuchten) Berghang verzeichnet eine relativ rasche Abnahme der Bodentemperatur mit einem Gradienten von stellenweise $1,5^\circ\text{C}/100\text{m}$, im Mittel $1,25^\circ\text{C}/100\text{m}$.
- Die Mittelzone, die Teile der afromontanen und -alpinen Stufe umfaßt, weist eine der freien Atmosphäre vergleichbare Temperaturabnahme auf, mit rund $0,5^\circ\text{C}/100\text{m}$. Dies stimmt bemerkenswert gut mit den Werten von WALTER (1973, 125) und GRIFFITHS (1972, 319) überein.
- Der Gipfelaufbau, topographisch oberhalb 4200 bis 4500 m, führt zu einer raschen Annäherung der Bodentemperatur an die Temperaturverhältnisse der freien At-

mosphäre, mit einem daraus resultierenden Gradienten von annähernd $1,0^\circ\text{C}/100\text{m}$.

Dieser Kurvenverlauf weist nochmals hin auf den in Kap. III festgestellten Zusammenhang zwischen T_B und T_L , mit deutlich höherer T_B im waldfreien Gebiet, aber annähernd gleichen Werten im Waldgürtel. Demgegenüber ist festzuhalten, daß viele aus der Literatur bekannte Lufttemperaturwerte (COE 1957, BRINKMAN et al 1968), teilweise auch die vom Autor 1978 erhobenen, um $1-2^\circ\text{C}$ tiefer liegen als GRIFFITHS' Modellwerte und damit näher der Temperatur der freien Atmosphäre sind. Lediglich der Kontrollwert der Station Nanyuki (Jahresmittel 1978, errechnet aus täglichen Max./Min.-Werten) stimmt erstaunlich gut mit der theoretischen

tischen Kurve überein. Hierin könnte sich natürlich der unterschiedliche Witterungsverlauf der einzelnen Jahre abzeichnen.

2. Expositionsdifferenzen (Abb. 4)

Die Bodentemperaturprofile der einzelnen Gebirgsexpositionen weichen erwartungsgemäß vom Mittelwertsprofil der Abb. 3 ab. Die Differenzen zwischen Lokal- und Gebirgstemperaturen sind für jede Höhenstufe als *Wärmeüberschuß*, bzw. *-mangel* darstellbar (Abb. 4). Alle Expositionen sind in mehr oder weniger ausgedehnte Höhenintervalle positiv oder negativ abweichender Temperaturen gegliedert, und es treten eigentliche Inversionen auf. Daß diese Abweichungen meist eine relativ geringe Streuung aufweisen, deutet auf großräumige Anomalien hin.

Generell weisen die Süd- und Westseite etwas tiefere T_B auf, die Nordseite entsprechend höhere. Auffallend ist die Gliederung der Ost-Exposition in einen relativ kühlen Gebirgsfuß und eine thermisch offensichtlich bevorzugte Mittelzone. Im Gipfelbereich (oberhalb 4500 m) werden die Expositionsunterschiede weitgehend verwischt. Eine Ausnahme bildet der oberste Abschnitt der Südexposition, der in einem gegen die vorherrschenden Windströmungen abgeschirmten Tal (Hobley Valley) erhoben wurde.

Es besteht nun offensichtlich ein weitgehender Zusammenhang zwischen diesen lokalen thermischen Abweichungen und der räumlichen *Niederschlagsverteilung*. Mengemäßig und in der vertikalen Verteilung der Niederschläge sind die Gebirgsexpositionen stark voneinander abgehoben. Auch wenn die verfügbaren Niederschlagsdaten mit beträchtlichen meßtechnischen Fehlern behaftet sein dürften (Betreuung des Meßnetzes, Ableseintervalle), kann doch das generelle Verteilungsmuster erfaßt und wie folgt umschrieben werden (vgl. Abb. 4):

- a) Insgesamt erhält die Südseite die meisten Niederschläge, E-, W- und N-Seite in dieser Reihenfolge z.T. beträchtlich weniger. Dieses aus 17-jährigen, teilweise lückenhaften Meßreihen hergeleitete Verteilungsmuster ist derart ausgeprägt, daß es auch in der überwiegenden Zahl der Einzeljahre festgestellt werden kann (COE, 1967; THOMPSON, 1966). Bereits COE (1967, 64) weist darauf hin, daß die verfügbaren Wassermengen im Hauptbewölkungsniveau (afro-alpine Zone) durch Nebel- und Tauniederschlag größer sein müssen, als effektiv gemessen wird. An den Expositionsunterschieden ändert sich allerdings kaum wesentliches.
- b) Ebenso entscheidend ist die *vertikale Gliederung*, namentlich auch in bezug auf die Höhenlage des *Niederschlagsmaximums*. Dieses liegt auf der E-Seite in der Fuß-

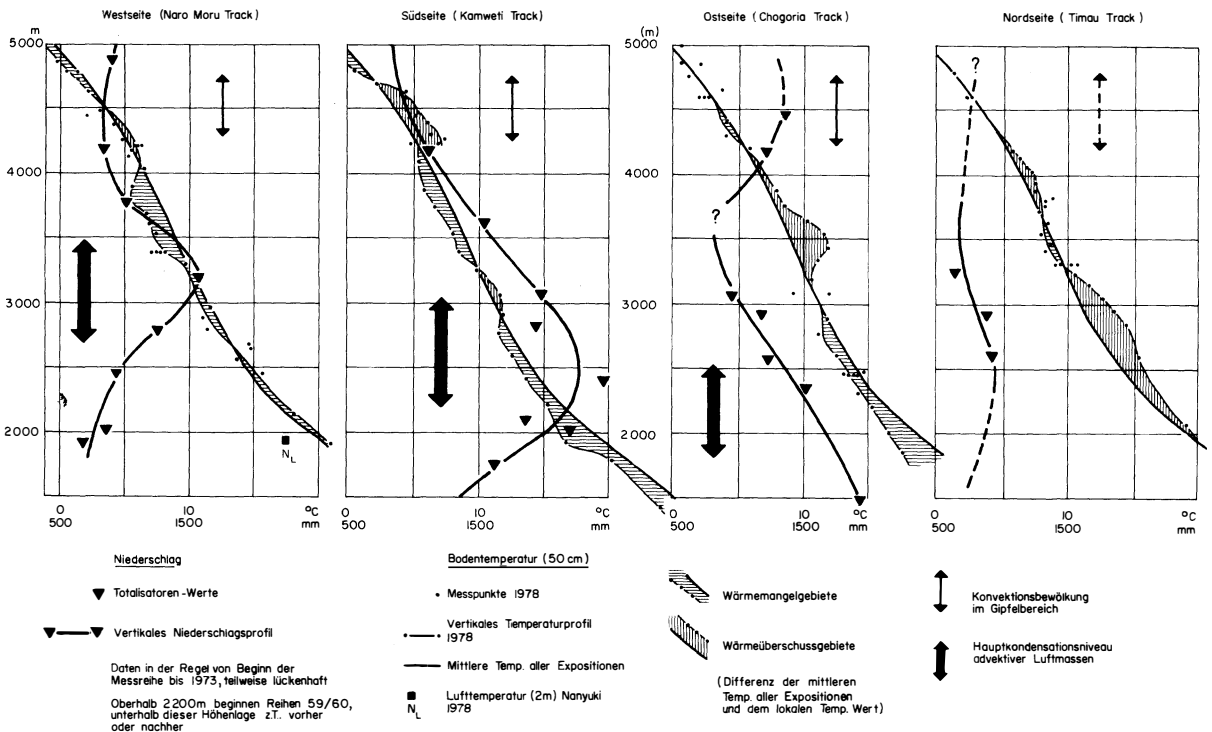


Abb. 4: Vertikale Niederschlags- und Bodentemperaturverteilung am Mt. Kenya in verschiedenen Expositionen. Wärmeüberschuß-, bzw. -mangelgebiete zeigen gute Übereinstimmung mit der Niederschlags- und Bewölkungsverteilung
Vertical distribution of precipitation and soil temperature on Mt. Kenya in different exposures. Areas with a surplus or deficit of heat show appropriate agreement with the distribution of precipitation and clouding

zone des Berges, steigt im S auf rund 2500 m, im W auf über 3000 m an, während die spärlichen Daten für die N-Seite kaum gesicherte Aussagen zulassen, die Verhältnisse aber mit großer Wahrscheinlichkeit vertikal relativ ausgeglichen sind.

- c) Über die *jahreszeitliche Niederschlagsverteilung* können ebenfalls nur relative Angaben gemacht werden, dahingehend, daß Trocken- und Feuchtzeiten in höheren Lagen zwar vorhanden sind, aber doch nicht in derselben Ausprägtheit auftreten wie im umliegenden Flachland. Ausnahmen bilden die praktisch immer feuchten tieferen und mittleren Lagen der Süd- und Ostseite und andererseits die im Norden doch akzentuierten Trockenphasen (vgl. COE, 1967, 60; JAETZOLD, 1977a, b).

3. Thermisch-hygrische Gliederung

Aus Abb. 4 wird nun ersichtlich, daß niederschlagsreiche Höhenabschnitte im wesentlichen mit Wärmemangelzonen, andererseits niederschlagsarme Bereiche mit Wärmeüberschusszonen zusammentreffen. Namentlich für die E-Exposition (Chogoria-Track) trifft dies fast modellhaft zu: das Niederschlagsmaximum in der Fußzone entspricht einem ebenso ausgedehnten Wärmedefizit, das regenarme Höhenintervall 3000–4000 m weist einen markanten Wärmeüberschuss aus, worauf nochmals eine Umkehr oberhalb 4000 m eintritt. Praktisch inverse Verhältnisse sind auf der west-exponierten Naro-Moru-Seite anzutreffen, besonders ausgeprägt im Höhenbereich um 3500 m, der hygrisch und thermisch völlig von der E-Seite abweicht.

Der Schluß darf gezogen werden, daß aufgrund der Wärmegliederung eine *relative Feuchtigkeitsgliederung* des Berges abgeleitet werden kann, die vereinfacht ein inverses Bild der thermischen Überschuss- bzw. Mangelgebiete ergibt (WINIGER, 1979). Eine differenziertere klimatische Raumgliederung müßte selbstverständlich auch das Vegetationsbild mit in Betracht ziehen, sich insbesondere aber auch auf zusätzliche Feldmessungen (z. B. Minimaltemperaturen, zeitlich differenziertere Niederschlagsmessungen) abstützen.

4. Ursachen der räumlichen Klimadifferenzen (Abb. 5)

Wenn wir nach den Ursachen der räumlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsunterschiede fragen, dann ist die Stellung des Berges im Strömungsfeld der atmosphärischen Zirkulation in Betracht zu ziehen.

Im jahreszeitlichen Wechsel sind es die süd- und nordhemisphärischen Passate und die innertropische Konvergenzzone (ITC), die Bewölkungs- und Niederschlagsablauf bestimmen. Für das Hochplateau ist der Durchgang der oft breiten ITC für die beiden Hauptregenzeiten verantwortlich, während in der übrigen Zeit des Jahres die Mächtigkeit der Passatgrundschicht meist zu gering ist für eine Niederschlagsauslösung. Nach BOUCHER (1975, 119) ist hierfür namentlich die im Mittel 3600 m hoch gelegene Passat-Inversion von Bedeutung, deren Ausprägung nach SCHNELL (1977, 22) im Vergleich zu andern Räumen allerdings nicht übermäßig stark ist. Von größter Bedeutung für Zirkulation und Nieder-

schlag sind dagegen der Küstenverlauf und der Aufbau des Hochplateaus, die einerseits die Windströmungen ablenken, zum andern den Feuchtigkeitsnachschub namentlich der NE-Passate reduzieren (vgl. auch FINDLATER, 1974).

Der Mt. Kenya modifiziert das Strömungsfeld der freien Atmosphäre und erzeugt ein vom Flachland in wesentlichen Punkten abweichendes Lokalklima. Entsprechende Überlegungen finden sich schon bei TROLL und WIEN (1949, 271), BRINKMAN et al (1968), COE (1967) und DAVIES et al (1977), die durch unsere Feldbeobachtungen, aber auch durch Satellitenbilder oder Modellversuche (YOSHINO, 1975, 404 zeigt Bilder eines Windkanalversuches mit einem Modell des Mt. Fuji) bestätigt worden sind. Dabei dominieren Staueffekte im Anströmungsbereich, zum andern bildet sich eine ausgeprägte Leewindzirkulation. Besonders auffällig manifestieren sich die Gebirgeinflüsse im Wolkenbild, gelegentlich fast modellhaft erkennbar in Satellitenbildern: die vom Passat mitgetragenen Wolkenfelder verdichten sich in der Gebirgsfußzone des Anströmungsbereiches (hohe Niederschläge im SE-Sektor), verwirbeln deutlich auf der Leeseite. Da die umliegenden Plateauflächen gegen Westen hin ansteigen, wird der Kondensations- bzw. Wolkenverdichtungsbereich ebenfalls abgehoben, was sich wiederum im orographischen Ansteigen der maximalen Niederschlagszone von Osten über Süden nach Westen hin abzeichnet.

Die Leewindzirkulation erzeugt einen aufsteigenden Luftstrom auf der westlichen Gebirgsseite mit verstärkter Bewölkungsbildung im Höhenbereich bis 4200 m. Dieser tageszeitenunabhängige Zirkulationsgang wird durch ein lokales tageszeitliches Berg-/Talwindssystem überlagert, bedingt durch Aufheizung, bzw. Abkühlung des Vulkankegels. Das Resultat dieser sich überlagernden Effekte haben die oben zitierten Autoren durch das sehr regelmäßige Auftreten anabatischer bzw. katabatischer Winde nachgewiesen (z. B. DAVIES et al, 1977, 416). Der daraus resultierende Bewölkungs- und Niederschlagstagesgang hat bedeutende Konsequenzen auf den Strahlungshaushalt, vorab mit einer deutlichen Bevorzugung der mittleren bis höheren Lagen der Ost- und Nordseite bezüglich Sonneneinstrahlung. Weitgehend unvergletscherte Ostflanken, teilweise höhere Seetemperaturen (vgl. LOEFFLER 1968, 29) sowie das in Abb. 4 dargelegte thermisch-hygrische Ungleichgewicht zwischen West- und Ostseite unterstreichen diesen Sachverhalt.

Daß dieser tageszeitlich-räumlich typische Gang der Klimatelemente für die meisten tropischen Gebirge zutrifft, wird z. B. von BARRY (1978) explizit vertreten. Selbst in den Randtropen dürfte aufgrund der Untersuchungen von LAUER in Mexiko (1973, 210) ein vergleichbares System wirksam sein.

In einem zusammenfassenden Schema (Abb. 5), das für den späten Vormittag repräsentativ sein soll, werden die Strömungsverhältnisse, die Hauptkondensationsniveaus (ansteigend von Ost nach West), die Leestromung, das strahlungsmäßige Überschussgebiet der mittelhoch gelegenen Ostflanke sowie die Konvektionsbewölkung im Gipfelbereich dargestellt. Ein sinngemäßes Schema der nächtlichen Strömungs- und Bewölkungsverhältnisse würde sich von Abb. 5 vor allem durch die wolkenfreien höheren Lagen (starke

Ausstrahlung bzw. Abkühlung) unterscheiden, und die Bergwinde würden die reduzierte Advektivbewölkung über weite Strecken vom Berg fernhalten.

V. Klimatische Gliederung und Vegetation

Wie schon mehrfach erwähnt, sind einzelne ökologisch entscheidende Grenzen (z. B. Waldgrenze) eng mit thermischen bzw. hygrischen Faktoren gekoppelt. Nachfolgend sollen nun *Vegetationsdeckungsgrad* und *Vegetationsstufen* den thermisch-hygrischen Verhältnissen, wie sie vorgängig diskutiert worden sind, gegenübergestellt werden. Dabei ist davon auszugehen, daß die limitierenden Klimatelemente in der hier verwendeten Form eher als Indikatoren, denn als direkte oder gar ausschließliche Ursache für eine bestimmte Formationsgrenze verstanden werden müssen. Eine weitergehende Interpretation müßte zusätzliche klimatische Limiten (Frostwechselfrequenz, Ausprägung der Trockenperioden) berücksichtigen, über die wir aber nur in Ansätzen verfügen (kurze Meßperioden). Hinzu kämen edaphische Faktoren.

Weiter ist zu berücksichtigen, daß die Grenzen eines Vegetationsgürtels nicht mit der Verbreitungsgrenze einer Art gleichzusetzen ist. So ist beispielsweise *Alchemilla argrophylla* nach HEDBERG (1968) zwischen 2300–4650 m anzutreffen, tritt aber in der oberen afroalpinen Vegetationsstufe in 3800–4300 m – vergesellschaftet mit *Senecio keniophytum* – an Hängen stellenweise flächendeckend auf (vgl. auch COE, 1967, 38). Neben die Standortfaktoren einer Einzelart tritt also Konkurrenz zwischen den Pflanzengesellschaften.

1. Der Vegetationsdeckungsgrad

Der Vegetationsdeckungsgrad wurde auf Normflächen (ca. 25×25 m²) geschätzt, möglichst unter Berücksichtigung mittlerer Hangneigungsverhältnisse. Die lokal teilweise bedeutenden Einflüsse von Relief und Boden wurden damit in den Hintergrund gedrängt. Somit dürften vor allem Temperatur, in etwas beschränkterem Ausmaß auch die Feuchtigkeitsverhältnisse als Hauptursache der mit der Höhe abnehmenden Vegetationsdichte bezeichnet werden.

a) Thermische Limiten

In Abb. 6 (linker Teil) ist der Deckungsgrad den thermischen Bedingungen der verschiedenen Höhenstufen gegenübergestellt (mittlere Bodentemperatur und Anzahl Frostwechseltage und Bodenniveau). Die Einbeziehung der Frostwechsel muß allerdings mit einiger Vorsicht aufgenommen werden, da nur vereinzelt zuverlässige Messungen in der Vegetationsdecke durchgeführt worden sind. Die Anzahl Frostwechseltage steht an einzelnen Stellen im Einklang mit Angaben nach JAETZOLD (1977, 31) und LAUER (1975, 19), während nach LOEFFLER (1968, 23) deren Häufigkeit in Höhen über 4500 m noch geraffter auftreten müßten. Oberhalb etwa 4800–5000 m, bei mittleren Lufttemperaturen unter 0 °C, muß wiederum mit einer schnellen Abnahme gerechnet werden.

Obwohl im Mittel über den ganzen Mt. Kenya die Vegetationsauflösung an verschiedenen Stellen – zumindest während der Trockenzeit – bereits oberhalb der Waldgrenze einsetzt, ist der entscheidende Vegetationsrückgang innerhalb

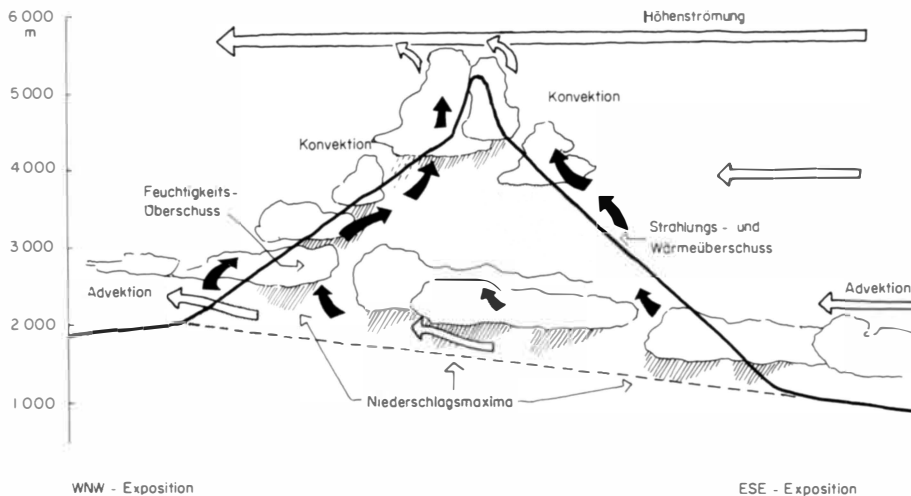


Abb. 5: Schema von Zirkulation, Bewölkungs- und Niederschlagsverteilung am Mt. Kenya für die Mittagsstunden. Wärmemangel-, bzw. Überschussgebiete fallen in Zonen mit höherer, bzw. geringerer Niederschlagsmenge. In der Nacht halten Bergwinde die Advektivbewölkung vom Bergfuß fern, die Konvektionsbewölkung entfällt

Schema of circulation as well as clouding and precipitation distribution on Mt. Kenya during midday. Areas of heat surplus or deficit occur in zones with greater or lesser precipitation quantities. During the night downslope winds prevent advective cloud reaching the mountain and there is no convective cloud formation

weniger 100 m Höhendifferenz anzusetzen: bei 4200 m ($T_B = 5,5^\circ\text{C}$) noch über 50%, bei 4500 ($T_B = 3,5^\circ\text{C}$) dagegen unter 10% Deckungsgrad, wobei in dieser Höhenlage praktisch täglicher Frostwechsel auftritt. WALTER (1973, 271) setzt für den Kilimanjaro die Vegetationsgrenze bei 4400 m ($T_B = 5^\circ\text{C}$) an. In einzelnen geschützten Nischen finden sich auch in größeren Höhen noch Gefäßpflanzen (1978 konnten am NE-Grat des Point Lenana vereinzelte *Senecio keniophyllum* bis 4930 m gefunden werden).

b) Hygrische Limiten

In Übereinstimmung mit SPOENEMANN (1977, 314) muß die Vegetationsauflösung am Mt. Kenya aber auch mit den *hygrischen Verhältnissen* in Beziehung gebracht werden. Dominieren in den höchsten Lagen vorab die tiefen Mitteltemperaturen und die große Anzahl der Frostwechsel, gewinnt in den mittleren und tieferen Lagen der Nord- und Ostseite, ferner auf windexponierten Kuppen, der Feuchtigkeitsmangel als limitierender Faktor eine zunehmende Bedeutung. Dabei muß gleich einschränkend erwähnt werden, daß während der Regenzeit dieses Bild verändert wird und der Deckungsgrad vorab in tieferen Lagen zunehmen kann, was in Abb. 6 entsprechend vermerkt worden ist.

Zu erwähnen bleibt, daß während der Trockenzeit die Frostwechseltätigkeit auf der arideren Nordabdachung des Mt. Kenya auch in tieferen Lagen größer sein kann als in vergleichbaren Höhen der anderen Expositionen. So wurden von uns am Timau Track in 3300 m Minima in 10 cm Höhe von -5°C gemessen. Häufig bleiben diese tiefen Temperaturen zumindest morphodynamisch aber ohne Wirkung, weil die Feuchtigkeit fehlt. Andererseits haben wir nach Strahlungsnächten, die auf einen Gewittertag folgten, selbst in diesen tiefen Lagen noch Nadeleis und schwache Strukturformen auf vegetationsfreien Flächen gefunden.

2. Vegetationsgliederung und thermisch-hygrische Limiten (Abb. 6)

Floristische und vegetationsökologische Untersuchungen sind am Mt. Kenya und den übrigen ostafrikanischen Hochgebirgen in großer Zahl durchgeführt worden. In unserer Arbeit stützen wir uns hauptsächlich auf die Publikationen von FRIES und FRIES (1948), HEDBERG (1964, 1968), COE (1967), LIND und MORRISON (1974), die Vegetationskarte von Kenia (1:250 000, Blatt 2, 1977) sowie auf Luft- und Satellitenbilder (Abb. 1 und Photo 1).

Im *thermisch-hygrischen Raum* (Abb. 6, rechte Hälfte) lassen sich Vegetationseinheiten abgrenzen. Sie wurden entlang der verschiedenen exponierten Aufstiegsrouten anlässlich der Bodentemperaturmessungen bestimmt. Bezüglich der Grenzziehung fällt auf, daß namentlich in den tieferen Lagen (v. a. Waldgürtel) die Zuordnung relativ eindeutig möglich war. Im afroalpinen Bereich dagegen findet eine stärkere Durchmischung einzelner Vegetationsstufen statt. Dies bedeutet, daß die mittleren Bodentemperaturen und Niederschlagswerte der Normflächen die Verhältnisse als Indikatoren zu wenig eindeutig beschreiben. Die LANDSAT-Aufnahme (Photo 1) vermittelt einen Eindruck von der Bedeu-

tung des Reliefs (Täler, Kämme), das namentlich im afroalpinen Bereich die Vegetation auch kleinräumig stark gliedert. Ein kleinflächiger Wechsel zwischen Rasenstreifen und Schuttrinnen ist typisch in diesem Höhenbereich. Ebenso finden sich in der gleichen thermisch-hygrischen Zone dichte Rasen- und *Lobelia keniensis*-Bestände (3900–4300 m, flache Talböden) sowie *Alchemilla*- und *Senecio keniodendron*-Gesellschaften (Talflanken) oder lediglich schwach bewachsene Stellen (Rippen, Kammlagen).

Besonders auffällig ist die deutliche Unterteilung in einen *dominant thermisch* gegliederten Bereich (mit $T_B \leq 9^\circ\text{C}$) und eine *sowohl thermisch wie hygrisch* unterteilte, tiefer gelegene Stufe. Sie werden nachfolgend kurz diskutiert.

a) Nivale Stufe

Sie ist wie die nächsttiefere periglaziale Stufe durch glaziale und morphodynamische Prozesse definiert. Am Mt. Kenya umfaßt sie den zentralen Gipfelaufbau oberhalb 4700–4800 m mit $T_B \leq 1^\circ\text{C}$ und praktisch täglichem Frost, im Vergleich zur Periglazialstufe allerdings reduziertem Frostwechsel. WALTER (1973, 131) gibt für die venezolanischen Anden bei der Schneegrenze (ca. in 4700 m) eine Bodentemperatur $T_B = -1,5^\circ\text{C}$ an, LAUER (1978, 103) findet die entsprechenden Werte in Mexiko mit 0°C bis $+1^\circ\text{C}$ in 4900 m.

Saisonal – je nach Sonnenstand – kann der Boden gefroren sein (vgl. Abb. 2.5). Permafrost wäre im höchsten Gipfelbereich zu erwarten. Ob die von uns vorgefundenen, bei wiederholten Besuchen stets gefrorenen Stellen dazu gezählt werden können, müßte durch gezielte weitere Beobachtungen bestätigt werden.

b) Periglaziale Stufe

Sie umfaßt die eigentliche Frostschuttstufe und greift in die afroalpine Vegetationsstufe hinunter, wobei die untere Abgrenzung in der Literatur nicht einheitlich definiert wird. Letztere ist nach SPOENEMANN (1977, 313) und HASTENRATH (1973, 164) durch das tiefste Auftreten von Rasenschalen bestimmt. MESSERLI (mdl. Mitt.) setzt die untere Grenze der Frostschuttstufe gleich mit dem Rückgang der Vegetationsbedeckung unter 50%.

Die Bodentemperatur T_B schwankt zwischen $1\text{--}4^\circ\text{C}$, mehr als 250–300 Frostwechseltage sind wahrscheinlich, vorab im Bereich der Talböden, wo teilweise sehr tiefe Temperaturen auftreten können (am 30. 8. 1979, 6.30 Uhr wurde vom Autor im Teleki Valley in 4200 m Höhe und 2 m über Boden eine Lufttemperatur von $-12,0^\circ\text{C}$ gemessen). Der Überlagerungsbereich mit der afroalpinen Vegetationsstufe geht stellenweise bis in Bereiche von $T_B \leq 7^\circ\text{C}$ hinunter. Höhenmäßig besteht eine starke Asymmetrie. So gibt SPOENEMANN (1977, 315) im Norden 3700 m, im Westen 3950 m als Untergrenze an. Nach unseren Beobachtungen dürften diese Höhenunterschiede sogar noch größer sein, da wir am Timau-Track (N-Seite) genetisch entsprechende Barflecken noch zwischen 3350–3600 m gefunden haben, wobei hier allerdings nochmals auf den Einfluß der Trockenheit hingewiesen werden muß.

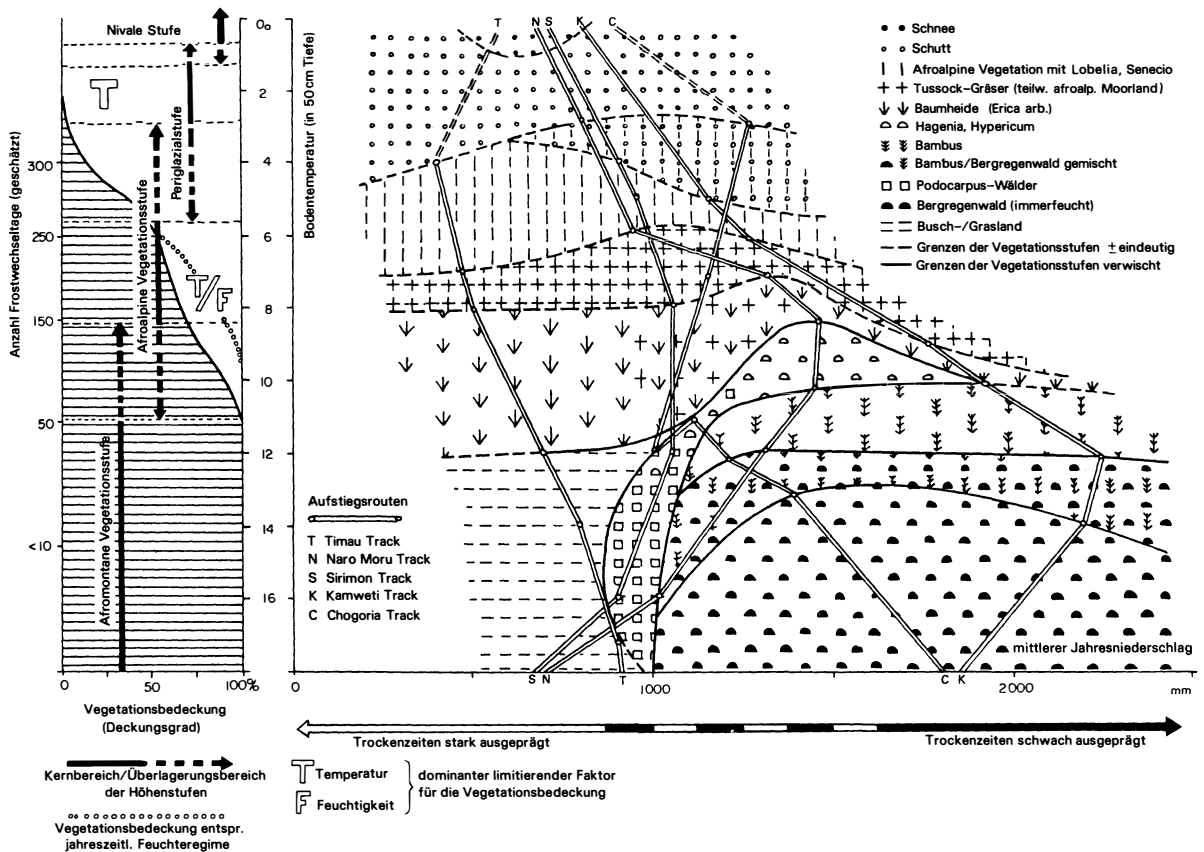


Abb. 6: Deckungsgrad und Höhenstufen der Vegetation als Funktion der thermisch-hygrischen Verhältnisse am Mt. Kenya. Im linken Teil des Schemas ist die Vegetationsauflösung in Abhängigkeit der Bodentemperaturen und teilweise geschätzter Frostwechseltage aufgeführt, ferner die vertikale Ausdehnung der Haupthöhenstufen. Mit T und F sind die dominanten limitierenden Klimaeinflüsse genannt.

Rechts werden im Koordinatennetz von Bodentemperatur und Niederschlagsregime Vegetationsstufen abgegrenzt. Auffallend ist die relativ klare thermisch-hygrische Gliederung der Waldstufe, andererseits die orographisch bedingte teilweise starke Durchmischung der afroalpinen Stufen

Degree of plant coverage and vegetation belts as a function of the thermo-hygric conditions on Mt. Kenya.

The left hand part of the diagram shows the disintegration of the vegetation in its dependency upon soil temperatures and days of – in part estimated – frost changes, together with the vertical extent of the main altitudinal gradations. T and F describe the dominant limiting climatic factors.

On the right hand vegetation grades are defined in the co-ordinate system of the soil temperature and precipitation regime. The relatively clear thermo-hygric gradation of the forest is striking; on the other hand the orographically-based and in parts considerable mixing of the afro-alpine belts can be noted

c) Afroalpine Vegetationsstufe

Sie umfaßt in der vorliegenden Darstellung den gesamten Vegetationsgürtel oberhalb der eigentlichen Waldgrenze: Ericaceengürtel, Tussockgrasgebiete (stellenweise Moorland) und die teilweise bereits dem Periglazialhöhenbereich zugehörigen Senecien- und Lobelienbestände. Dabei sei nochmals die gegenseitige vertikale Durchdringung der Formationen erwähnt.

Die für den Mt. Kenya typischen Expositionssymmetrien sind besonders ausgeprägt in der Verteilung des Moorlandes, das auf der trockenen N- und E-Seite weitgehend fehlt. In

dieser Beurteilung ergeben sich allerdings große Abweichungen zur Literatur. So enthält z.B. die Vegetationskarte (TRAPNELL et al, 1976) einen geschlossenen Moorlandgürtel rund um den Berg, entsprechende Angaben finden sich auch in den topographischen Karten 1:50 000. Dabei wird offensichtlich aus dem Vorhandensein von Tussockgräsern auf Moorland geschlossen, während nach FREI (1978) Moore primär edaphisch zu begründen sind (hohe Anteile an organischem Material).

Ebenfalls stark unterschiedlich ist die Verteilung der Ericaenbestände, die im Norden weitverbreitet sind, im Westen und Süden, teilweise auch im Osten eher konzentriert auftre-

ten und dann häufig (v. a. im Bereich der Waldgrenze) Baumgröße erreichen können.

Insgesamt sind natürlich auch die Deckungsgrade je nach Exposition verschieden. Es muß aber abschließend darauf hingewiesen werden, daß ausgedehnte Brände namentlich die trockenen Expositionen zu Beginn der 70er Jahre stark beeinträchtigt haben und damit Differenzen im Vegetationsbild akzentuiert werden.

d) Afromontane Stufe

Diese Stufe ist sowohl in der Landschaft, wie im thermisch-hygrischen Raum klar abgegrenzt. Eine Unterteilung in den eigentlichen Waldgürtel sowie in die agrarisch genutzte Gras- und Buschlandstufe im Norden ist zweckmäßig. Die Grenze zwischen diesen Untereinheiten ist hygrisch bestimmt und liegt bei ca. 900 mm Jahresniederschlag.

Gras- und Buschlandstufe: Sie wird von den thermischen Höhenstufen wenig beeinflusst. Ein weitgehend gelichteter Wald mit wenig sklerophyllen Baumarten ist in vereinzelt Resten vorhanden, z. T. auf Bachrinnen konzentriert. Im übrigen dominiert Busch- und Grasvegetation. Auch hier ist die natürliche Vegetationsdecke insgesamt durch Brände und dazu durch eine intensive agrarische Nutzung (in jüngster Zeit am Timau Track Ackerbau bis 3200 m!) stark verändert worden.

Die eigentlichen *Bergregenwälder* der West-, Süd- und Ostexposition sind vor allem thermisch abgestuft. Namentlich die reinen *Bambusbestände* sind nur innerhalb einer ausgesprochen geringen Temperaturspanne von 2°C anzutreffen, während sie hygrisch unter wesentlich unterschiedlicheren Verhältnissen gedeihen. Der oft genannte minimale Niederschlag von 2000 mm wird hier beträchtlich unterschritten. Allerdings ist gerade dieser Gürtel sehr oft in Wolken gehüllt, so daß ein nur schwer bestimmbares Quantum Feuchtigkeit zusätzlich zum eigentlichen Niederschlag verfügbar ist. Im LANDSAT-Bild (Photo 1) treten diese Bambusbestände und die namentlich im W und NE dominanten Bambus-Wald-Mischtypen als hellrote Flächen in Erscheinung.

Die arten- und epiphytenreichen Bergregenwälder der östlichen und südlichen Fußzone mit *Ocotea* und *Podocarpus* sind an hohe Niederschläge gebunden (> 1800 mm). Sie werden in den tiefer gelegenen Teilen stark genutzt und sind teilweise durch Sekundärwälder oder großflächige Pflanzungen (z. B. *Pinus*) ersetzt. Mit abnehmenden Niederschlägen (W- und NE-Seite) weisen diese Wälder zunehmend sklerophylle Zusammensetzungen auf, bei gleichzeitig reduzierter Artenzahl und geringerer Bestandesdichte. *Podocarpus-Juniperus-Wälder* dominieren im Grenzbereich gegen das Busch-

Grasland im Norden und in den untersten Lagen der W-Seite.

Oberhalb des Bambus-Gürtels und über weite Gebiete am Mt. Kenya die Waldgrenze bildend, findet sich ein schmaler *Hagenia-Hypericum-Gürtel*, besonders ausgeprägt auf der W-Seite.

e) Waldgrenze

Aus Abb. 6 wird ersichtlich, daß die Waldgrenze thermisch einen recht breiten Spielraum beansprucht. Die Werte

reichen von $T_B=7^\circ\text{C}$ (Naro Moru Track, W-Seite) bis $T_B=11,0^\circ\text{C}$ (Kamweti Track, S-Seite). Über weite Strecken dürften jedoch an der Waldgrenze Werte zwischen $T_B=8-9^\circ\text{C}$ ($\pm 1^\circ\text{C}$, je nach lokalen Feuchtigkeitsbedingungen) gemessen werden. In diesem Sinne bedürfen die beiden Extremwerte eines weiteren Kommentars. Die am Naro Moru Track bei der Waldgrenze gemessenen $T_B=7,0^\circ\text{C}$ sind zweifellos in den Zusammenhang mit dem bis unmittelbar an die Waldgrenze reichenden Moorland zu bringen, das für eine bedeutende Temperaturdepression über weite Höhenbereiche verantwortlich gemacht werden kann. Bereits 100 m unterhalb der Waldgrenze werden rund 9°C gemessen. Bemerkenswert ist, daß auf der gleichen Naro Moru Aufstiegsroute in rund 4000 m T_B immer noch $7,0^\circ\text{C}$ beträgt, ohne daß aber in diesem Bereich noch Waldvegetation anzutreffen wäre. Sicher spielt hier die unterschiedliche Zahl von Frostwechseltagen mit, die an der gegenwärtigen Waldgrenze rund 100, in 4000 m wahrscheinlich bereits 200 beträgt. Daraus darf wohl geschlossen werden, daß der oft genannte typische Wert von $T_B=7,0^\circ\text{C}$ an der Waldgrenze wohl eine notwendige, nicht aber eine hinreichende Bedingung für das allgemeine Aufkommen der Baumvegetation ist.

Der andere Extremwert von $T_B=11,0^\circ\text{C}$ ist insofern mit einiger Unsicherheit belastet, als im Bereich des Kamweti Tracks (S-Seite) eine genaue Lokalisierung der Waldgrenze nicht ohne weiteres möglich ist, indem auf den Bambusgürtel unmittelbar hochstämmige Ericaceen (Giant Heath) folgen, die in dieser Arbeit nicht mehr zum Waldgürtel gezählt werden. Damit liegt die Meßstelle rund 200 m tiefer als an den übrigen Waldgrenzen.

VI. Übertragbarkeit der Ergebnisse

Wir konnten für den Mt. Kenya zeigen, daß zwischen T_B , T_L und Feuchtigkeitsverhältnissen (Niederschlag) quantitative, teilweise qualitative Zusammenhänge bestehen. Einzelne Grenzen morphodynamischer Prozesse oder der Vegetationsstufen lassen sich mit thermisch-hygrischen Intervallen in Beziehung setzen. Die Frage drängt sich auf, wieweit diese Ergebnisse in andere Räume, gegebenenfalls auch zeitlich (andere Klimaverhältnisse) übertragbar sind.

Wiederrum eignet sich die *Waldgrenze* zur Überprüfung dieses Sachverhaltes. Sie war ja auch methodischer Ansatzpunkt zum Einbezug der Bodentemperatur als klimaökologisches Gliederungselement. In Abb. 7 sind alle uns zugänglich gewordenen Bodentemperaturmessungen in tropischen Hochgebirgen zusammengestellt. Daraus wird ersichtlich, daß die Höhenlage der Waldgrenze innerhalb eines Intervalls von 600 m zwischen 2830 m und 3430 m anzusetzen ist, wobei je nach Höhenlage und Exposition die Bodentemperatur T_B zwischen $7,0$ und $11,5^\circ\text{C}$ schwankt, im gleichen Intervall also wie am Mt. Kenya. Für alle erfaßten Gebirge dürfte zudem die Niederschlagsmenge an dieser Grenze größer oder mindestens 900 mm pro Jahr sein. Über die dritte hier verwendete Einflußgröße – die Frostwechselzahl – liegt leider zu wenig Vergleichsmaterial vor.

In Abb. 7 fallen Mt. Cameroon und Pico de Orizaba in be-

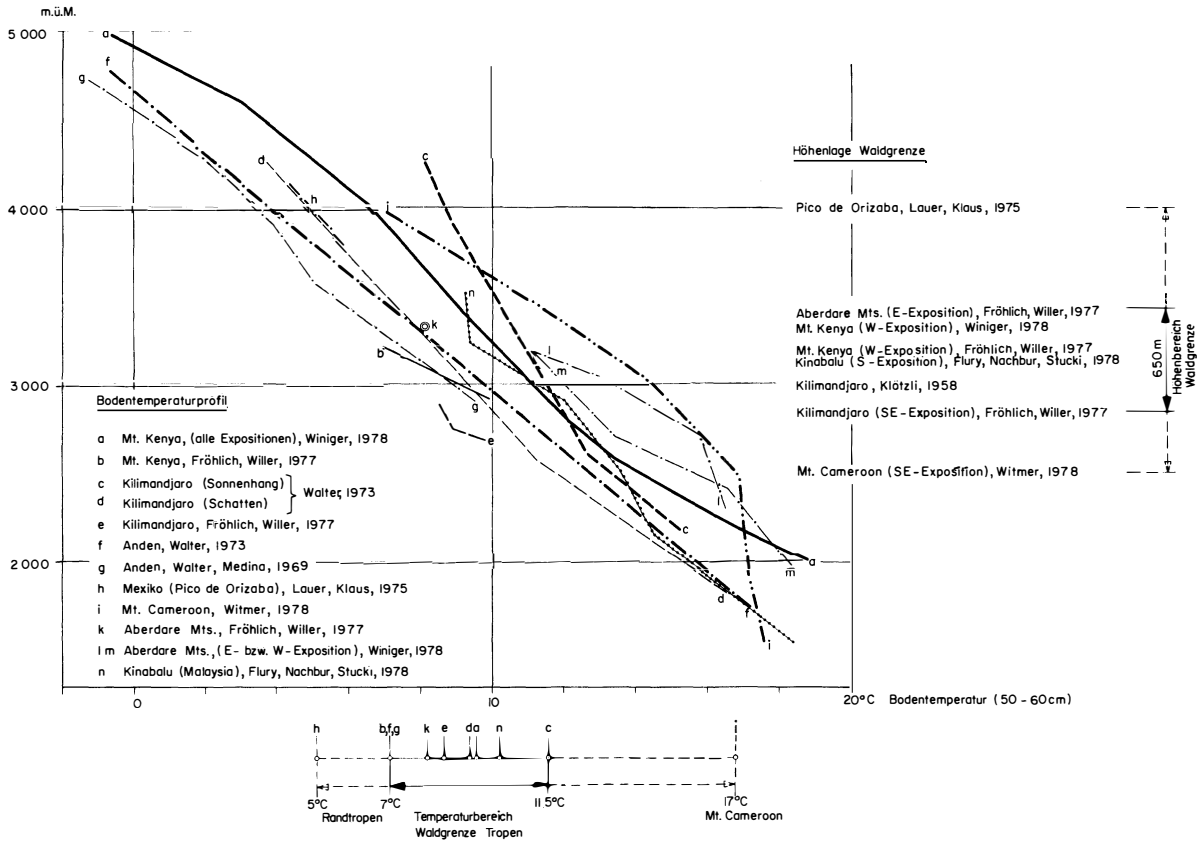


Abb. 7: Bodentemperaturprofile (geglättete Kurven) und Höhenlage der Waldgrenze verschiedener Tropischer Hochgebirge. Der zentrale Wert liegt etwa bei 9 °C für die Bodentemperatur. Extremwerte treten für den randtropischen Pico de Orizaba und den Mt. Cameroon auf. Beim Vergleich einheitlicher Meßstandorte (z. B. Sonnen-, Schattengang) wird das thermische Intervall noch enger (Ergänzt nach WINIGER, 1979, 126)

Profiles of soil temperature (smoothed curves) and height of the timber-line of various tropical high mountains. The central value occurs at about 9 °C. Extreme values are recorded for the subtropical Pico de Orizaba and Mt. Cameroon. Where similar measurement locations (for instance sunny or shaded slopes) are compared the thermal interval becomes even narrower (supplemented after WINIGER, 1979, 126)

zug auf die Höhenlage der Waldgrenze stark aus dem Rahmen. Am Mt. Cameroon vermutet WITMER (1978) geothermische Einflüsse, die für die rel. hohen Bodentemperaturen und die tiefe Waldgrenze verantwortlich sind, JAETZOLD (in WINIGER, 1979, 149) dagegen weist auf die Möglichkeit der floristisch isolierten Stellung dieses Berges hin. Der Pico de Orizaba ist bereits ein Randtropengebirge, für das nicht mehr in allen Teilen klimatische Bedingungen wie im Tageszeitenklima anzutreffen sind.

Gleichzeitig thermische wie hygrische Gliederungen liegen in vergleichbarer Art für andere Hochgebirgsräume nur vereinzelt vor. In einem Vegetationsprofil des *Pico Bolivar* (Venezuela) verwendete WALTER (1973, 131) ebenfalls Bodentemperatur und Niederschlag (relativer Gang) als Kenngrößen einzelner Höhenstufen. So liegt eine untere, hygrisch bedingte Waldgrenze bei rund 850–900 mm Niederschlag. Die höhere Waldstufe wird von immergrünen Nebelwäldern

eingenommen, die bei $T_b = 7,0^\circ\text{C}$ ihre obere Begrenzung finden. Bemerkenswert ist, daß die obere Stufe der Paramos vergleichsweise tiefere Temperaturen als der entsprechende Höhenbereich am Mt. Kenya aufweisen (in 4000 m etwa $T_B = 2,5^\circ\text{C}$, gegenüber etwa $6,0^\circ\text{C}$). Ein vergleichbares Profil für den schon mehrfach erwähnten *Pico de Orizaba* (LAUER, KLAUS, 1975) ergibt eine fast identische Niederschlagsverteilung wie die Westseite des Mt. Kenya und durchaus vergleichbare Temperaturverhältnisse bei allerdings abweichenden Frostwechselzahlen, wobei hier die nicht mehr vernachlässigbaren thermischen Jahreszeiten in Erscheinung treten. Die Vegetationsdecke scheint ebenfalls bei rund 4400 m weitgehend aufgelöst zu sein, die alpine Stufe (tierra helada) enthält aber noch *Pinus hartwegii*-Bestände, die ihre obere Begrenzung erst bei 4000 m finden.

Einzelne räumliche Vergleiche ließen sich wohl über die quantitativen Zusammenhänge zwischen T_L und T_B herlei-

ten. So kann mit Hilfe der Lufttemperatur die Bodentemperatur im nur spärlich vorhandenen Bambusgürtel der *Bale Mts.* (7°N, Südäthiopien) auf 13,5°C festgelegt werden, ein Wert also, der im gleichen thermischen Intervall (12–14°C) liegt, das auch den Bambusgürtel am Mt. Kenya einschließt. Allerdings fehlt hierzu die Feldverifikation.

Abschließend sei an einem Beispiel auf die Möglichkeit hingewiesen, die klima-ökologischen Grenzwerte oder Indikatoren in *klima- und vegetationsgeschichtlichen Fragestellungen* heranzuziehen. So läßt sich aufgrund der am Mt. Kenya vermuteten letztkaltzeitlichen Höhenlage der Schneegrenze (etwa bei 3600 m) und Periglazialuntergrenze (etwa 2700 m) eine Temperaturdepression von 6–8°C für Ostafrika annehmen (WINIGER, MESSERLI, 1978). Eine Waldvegetation wäre unter jenen thermischen Bedingungen höchstens noch in der Fußzone in Ansätzen möglich gewesen, gleiche oder etwas größere Feuchtigkeit vorausgesetzt. Bei trockeneren Verhältnissen dagegen wäre er vollständig weggefallen oder als Galeriewald auf die Flußtäler reduziert worden.

Eine Festigung – oder Verwerfung – solcher Hypothesen müßte aber auf weiteren aktual-klimaökologischen Vergleichsmessungen in tropischen Hochgebirgen aufbauen.

Literatur

- BARRY, R. G.: Tagesgang-Effekte auf das Topoklima an einem äquatorialen Berg. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Heft 32, 72/1–72/8, 1978.
- BOUCHER, K.: Global Climate. London, 1975.
- BRINKMAN, S. E., WURZEL, P., JAETZOLD, R.: Meteorological observations on Mount Kenya. East African Meteorological Department. Mem. 4,5, 42 p., 1968.
- BROWN, L. H., COCHEME, J.: A study of the agroclimatology of the highlands of Eastern Africa. FAO-UNESCO-WMO Interagency Agroclimatology Project, FAO Rome, 1969
- COE, M. J.: The Ecology of the Alpine Zone of Mount Kenya. The Hague, 1967.
- DAVIES, T. D., BRIMBLECOMBE, P., VINCENT, C. E.: The daily cycle of Weather on Mount Kenya. *Weather*, 32 (11), 406–417, 1977.
- FINDLATER, J.: The low-level cross-equatorial air current of the western Indian Ocean during the northern summer. *Weather*, 29 (11), 411–416, 1974.
- FLURY, M., NACHBUR, B., STUCKI, A.: Bodentemperaturmessungen am Kinabalu (Borneo). Manuskript Geogr. Inst. Univ. Bern, 1979.
- FREI, E.: Anedepts in some High Mountains of East Africa. *Geoderma*, 21 (2), 119–131, 1978.
- FRIES, R. E., FRIES, T. C. E.: Phytogeographical Researches on Mount Kenya and Mt. Aberdare (British East Africa). Kungl. Svenska Vetensk. Akad. Handl. Band 25, No. 5. Stockholm, 1948.
- FRÖHLICH, W., WILLER, M.: Bodentemperaturen und obere Waldgrenze. Vorläufiger Bericht über Untersuchungen an den Hochbergen Ostafrikas. *Die Erde*, 1977 (4), 347–355, 1977.
- GRIFFITHS, J. F.: Climates of Africa. *World Survey of Climatology*. Vol. 10, 1972.
- HASTENRATH, S.: Observations on the periglacial morphology of Mts. Kenya and Kilimanjaro, East Africa. *Z. Geomorph. Suppl.*, 16, 161–179, 1973.
- HEDBERG, O.: Taxonomic and ecological studies on the Afroalpine Flora of Mt. Kenya. *High Mountain Research*, 1, 171–194, 1968.
- : Etudes écologiques de la flore afroalpine. *Bull. de la Soc. Royale de Botanique de Belgique*, 97, 5–18, 1964.
- JAETZOLD, R.: Das Klima. In: W. LEIFER (Ed.), *Kenia*. S. 30–50. Erdmann, Tübingen und Basel, 1977a.
- : Klimageographie des Blattes Lake Victoria des Afrikakartenwerkes der DFG. 1:1 Mio. Berlin, 1977b.
- KLÖTZLI, F.: Zur Pflanzensoziologie der alpinen Stufe des Kilimandscharo. *Ber. Geob. Inst. Rübel*, 1957, 33–59, 1958.
- KNAPP, R.: Die Vegetation von Afrika. *Vegetationsmonographien der einzelnen Großräume*, Bd. III (Hrsg. H. WALTER), Fischer. Stuttgart, 1973.
- LAUER, W.: Ökologische Klimatypen am Ostabfall der Mexikanischen Meseta. Erläuterungen zu einer Klimakarte. *Erdkunde*, 32, 101–110, 1978.
- : Vom Wesen der Tropen. Klimaökologische Studien zum Inhalt und zur Abgrenzung eines irdischen Landschaftsgürtels. *Abh. d. Akad. d. Wiss. u. d. Lit. Mainz, Math.-nat. Kl. Nr. 3*, Wiesbaden, 1975.
- : Zusammenhänge zwischen Klima und Vegetation am Ostabfall der mexikanischen Meseta. *Erdkunde*, 27, 192–213, 1973.
- LAUER, W., KLAUS, D.: Geocological investigations on the timberline of Pico de Orizaba, Mexico. *Arctic and Alpine Research*, 1975, 315–330, 1975.
- LIND, E. M., MORRISON, M. E. S.: *East African Vegetation*. Longman. London, 1974.
- LÖFFLER, H.: Die Hochgebirgsseen Ostafrikas. *High Mountain Research*, 1, 3–68, 1968.
- SCHNELL, R. C., ODH, S. A.: Mount Kenya Baseline Station Feasibility Study. Report of Activities to Nov. 16, 1977. Nairobi (not for public release), 1977.
- SCHNELL, R. C., ODH, S., NJAU, L. N.: Mount Kenya Baseline Station Feasibility Study. Report of Activities to June 26, 1978. Nairobi (not for public release), 1978.
- SPÖNEMANN, J.: Die Periglaziale Höhenstufe Ostafrikas. *Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Klasse, Dritte Folge*, Nr. 31, 300–332, 1977.
- THOMPSON, B. W.: The mean annual rainfall of Mt. Kenya. *Weather*, 21, 48–49, 1966.
- TRAPNELL, C. G., BIRCH, W. R., BRUNT, M. A., LAWTON, R. M.: Kenya – Vegetation. Map 1:250 000, Sheet 2. Directorates of Overseas Surveys. London, 1976.
- TROLL, C., WIEN, K.: Der Lewis Glacier am Mt. Kenya. *Geogr. Annaler*, 1–4, 257–274, 1949.
- WALTER, H.: Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung. Band I: Die tropischen und subtropischen Zonen. Stuttgart, 1973.
- : Grundlagen der Pflanzenverbreitung. Standortlehre (analytisch-ökologische Geobotanik). Einführung in die Phytologie II/1. Stuttgart, 1960.
- WALTER, H., MEDINA, E.: Die Bodentemperatur als ausschlaggebender Faktor für die Gliederung der subalpinen und alpinen Stufe in den Anden Venezuelas. *Ber. Dtsch. Bot. Ges.*, 82, 275–281, 1969.
- WINIGER, M.: Bodentemperaturen und Niederschlag als Indikatoren einer klimatisch-ökologischen Gliederung tropischer Gebirgsräume. Methodische Aspekte und Anwendbarkeit dargestellt am Beispiel des Mt. Kenya. *Geomethodica*, 4, 121–150, 1979.
- WINIGER, M., MESSERLI, B.: Rezente und kaltzeitliche klima-ökologische Gliederung der afrikanischen Hochgebirge zwischen Mittelmeer und Äquator. *Int. Tagung f. Alpine Meteorologie*. Veröff. MZA, 125–128, 1978.

WITMER, U.: Klimatische Höhenstufen am Kamerunberg. Kamerun – Grundlagen zu Natur- und Kulturraum. Probleme der Entwicklungszusammenarbeit, S. 189–201. Geographica Bernensia G9, Univ. Bern, 1978.

WMO: Short-period averages for 1951–1960 and provisional average values for Climat Temp and Climat Temp Ship Stations. WMO/No. 170.TP. 84. Geneva, 1965.

YOSHINO, N. M.: Climate in a small area. Tokyo, 1975.

DIE OSTSIBIRISCHE STEPPENLANDWIRTSCHAFT – NEULANDGEWINNUNG UND IHRE ÖKOLOGISCHE PROBLEMATIK

Mit 11 Abbildungen, 2 Photos und 6 Tabellen

NORBERT WEIN

Summary: The agriculture of the eastern Siberian steppes – the winning of new land and its ecological problematic

The island-like steppes in the Chakassija autonomous region agriculturallyfavoured area of 20,000 km² in eastern Siberia. Soil and climate conditions offer favourable prerequisites for the cultivation of wheat. During the 1950s the programme of reclaiming new land succeeded in increasing the arable acreage of Chakassija from about 345,000 ha to 800,000 ha. The consequence of this large-scale ploughing-up of steppe was a tremendous increase in wind erosion, which led to the degradation of the soils. Besides other measures of soil amelioration in Chakassija parcellation was introduced on the pattern of American "strip-cropping" and succeeded in checking the wind erosion. The intensive crop rotation connected with the strip cultivation led to further stabilisation of agriculture. Today 56 Sovchozen cultivate the agricultural area

in a mixed economy of cattle breeding and grain growing. The present industrialisation of Chakassija (konstruktion of a territorial production complex) will require a further intensification of the farming industry, which is to form the alimentary basis for the growing numbers of the population. The extension of industry, however, will also result in labour problems in agricultural concerns.

Ostsibirien ist innerhalb der letzten Jahrzehnte von einem landwirtschaftlichen Zuschußgebiet zu einer – zumindest an Grundnahrungsmitteln – autarken Region geworden, die sogar landwirtschaftliche Produkte in andere Landesteile auszuführen imstande ist. Einer Bevölkerung von 9 Mio. Menschen steht folgendes landwirtschaftliches Potential gegen über:

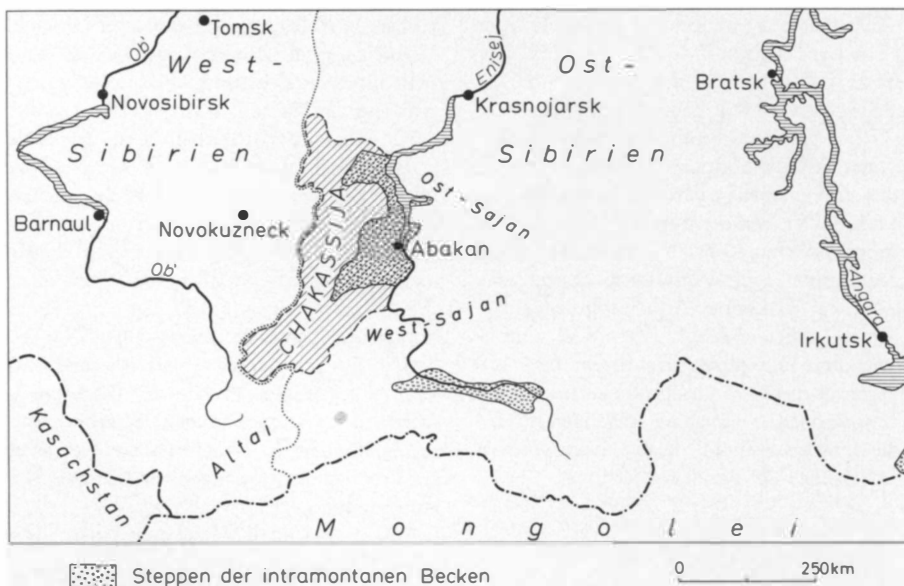


Abb. 1: Lage Chakassijas (schräg schraffierte Fläche) im Süden Ostsibiriens. Punktiert: Steppen der intramontanen Becken

The Chakassija Region in the south of East-Siberia

Entwurf: N. WEIN