

2. DIE ÖKOLOGISCHEN BEDINGUNGEN DER TROPEN

2.1. Klima

2.1.1. Klimatische Klassifikationen der Tropen

Einleitung:

Die klimatisch-zonalen Klassifizierungen der Erde richten sich vor allem nach Temperatur und Niederschlägen. Niederschläge sind zu differenzieren in absolute Niederschläge und jahreszeitliche Verteilung, was besonders im Hinblick auf ackerbauliche Nutzung eine unabdingbare Notwendigkeit darstellt.

Innerhalb der Tropen, die sich definitionsgemäß zwischen den Wendekreisen von $23\frac{1}{2}^{\circ}$ nördlicher Breite bis $23\frac{1}{2}^{\circ}$ südlicher Breite erstrecken, unterscheidet man die immerfeuchten inneren und die wechselfeuchten äußeren Tropen.

In den Tropen sind die Schwankungen der Tag- und Nachttemperaturen größer als die Schwankungen im Jahresmittel (Tageszeitenklima). In den äquatornahen (inneren) Tropen sind die Temperaturen besonders gleichmäßig. In den wechselfeuchten Tropen werden die Schwankungen (Tag/Nacht und jahreszeitlich) größer. Eigentlich differenzierend wirken aber nicht die geringen Temperaturunterschiede¹⁾, sondern die unterschiedlichen Niederschlagsverhältnisse.

Abbildung 2.1.a (nach DE MARTONNE, 1958, in SANCHEZ, 1976) zeigt das "ideale" Auftreten von Regen- und Trockenzeiten in verschiedenen tropischen Breiten. Bedingt durch die unterschiedliche Verteilung der Landmassen herrschen auf der Nordhalbkugel etwas andere Verhältnisse als auf der Südhalbkugel (KÖPPEN, 1936). So verläuft zum Beispiel der Wärmeäquator etwa 10° nördlich des geographischen Äquators (WALTER, 1979). Abweichend von den idealen Verhältnissen treten Klimate auf, die nicht den typisch zonalen Klimaten entsprechen. So führen in Monsunklimaten (Südasien, Südostasien) jahreszeitlich auftretende Winde (auf

1) Gilt nicht für die tropischen Höhenlagen

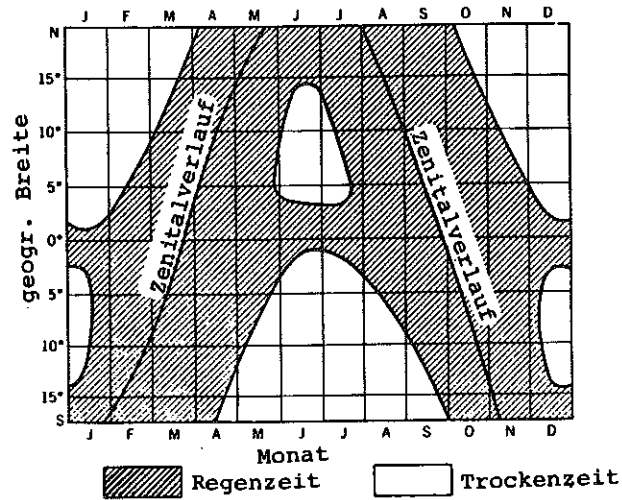


Abb. 2.1.a: Diagramm des idealen Verlaufs der Jahreszeiten in inner-tropischen Regionen (nach DE MARTONNE, 1957)

der Nordhalbkugel der Nord-Ost-Passat), auf der Südhalbkugel der Süd-Ost-Passat) Feuchtigkeit und Niederschläge heran. Beim Auftreffen auf die Landmassen kommt es zu Niederschlägen (besonders an Gebirgen). Die windabgewandte Seite liegt dann im Regenschatten. Besonders deutlich wird das in Sri Lanka (Ceylon), wo das Klima hauptsächlich aus dem Zusammenwirken der Monsunwinde mit dem Relief geprägt ist: In den Sommermonaten bringt der Südwestpassat die Hauptniederschläge im dichtbesiedelten, agrarisch intensiv genutzten Südwesten der Insel. Der Nordostpassat bringt in den Wintermonaten die (insgesamt geringeren) Hauptniederschläge für den Norden der Insel. Eine Trockenzone befindet sich an der flachen Nordspitze der Insel.

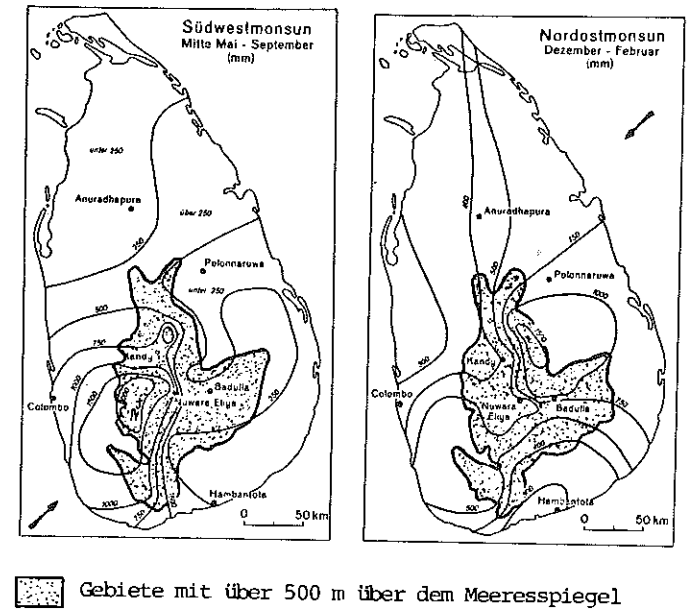


Abb. 2.1.b: Niederschlagsverteilung über SRI LANKA zu unterschiedlichen Jahreszeiten bei unterschiedlichen Winden (DOMRÖS, 1971, verändert)

In manchen Regionen (z.B. Karibik, Philippinen) treten häufig tropische Wirbelstürme auf, die großen Schaden an landwirtschaftlichen Kulturen verursachen.

Da die wirklich auftretenden Klimate nur selten dem 'idealen' Charakter entsprechen, der sich aus der Breitenlage ergibt, wurden Klassifizierungssysteme entwickelt, die "unabhängig" von der Breitenlage weitgehend an den Niederschlagscharakteristika und den Temperaturen orientiert sind.

Sie erlauben uns auch, Standorte mit "gleichen" oder sehr ähnlichen Klimaten zu vergleichen, die geographisch nicht genau den gleichen Breiten angehören, d.h. ein tropischer Standort, der Dauer und Menge seiner Niederschläge durch Monsunwinde erhält, unterscheidet sich agroklimatisch oder vegetationsökologisch nur wenig von einem tropischen Standort, der die gleichen Niederschlagsverhältnisse den zenitalen Niederschlägen verdankt. In der Standortssystematik nehmen sie den selben Platz ein.

Bevor wir uns nun den eigentlichen Klassifikationssystemen zuwenden, noch einige Bemerkungen zu den einzelnen Klimafaktoren in den Tropen.

Niederschläge und Verdunstung:

Niederschläge und Verdunstung bestimmen weitgehend den Wasserhaushalt eines Standorts. Unter tropischen Verhältnissen wurden zum Beispiel folgende Werte ermittelt.

Tab. 2.1.1 Niederschläge und potentielle Evapotranspiration (ETP) an verschiedenen tropischen Standorten pro Jahr (aus MÜLLER, M., 1982)

	Niederschläge mm/Jahr	Potentielle Verdunstung (ETP) mm/Jahr	Jahresdurch- schnittstempla- tur in °C
YANGAMBI (immergrüner Regen- wald)	1828	1312	24,6
BOUAKE (Feuchtsavanne)	1210	1547	26,6
OUAGADOUGOU (Trockensavanne)	897	1770	28,8

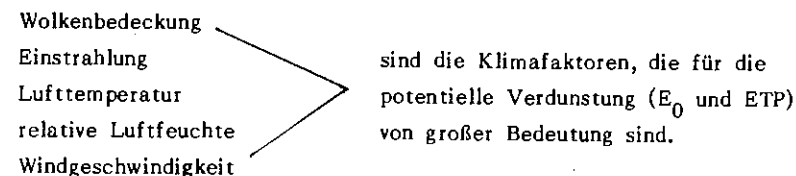
Die wechselfeuchten Tropen sind durch Jahreszeiten mit stark unterschiedlichen Verdunstungsraten gekennzeichnet. So schwanken zum Beispiel in OUAGADOUGOU die Werte für die potentielle Evaporation zwischen 4,1 (Regenzeit) und 5,7 mm/Tag in der heißen, sonnigen Jahreszeit (MÜLLER, 1982). Ist der Niederschlag größer als die Verdunstung, spricht man von Humidität, ist er kleiner, von Aridität. Während für Niederschläge oft langjährige Messungen in einem relativ dichten Stationsnetz vorliegen, ist die Bestimmung der Verdunstung bis heute problematisch. Verschiedene Methoden und Konzeptionen tragen hier zu einer beträchtlichen Unsicherheit und Begriffsverwirrung bei.

Hier kurz einige Definitionen:

- Unter **potentieller Evaporation** (E_0) versteht man die Verdunstung einer theoretisch unbegrenzten, freien Wasseroberfläche. Sie kann mittels Verdunstungskesseln (z.B. Class-A-Pan) oder Formeln bestimmt

werden (z.B. PENMAN, 1948) und dient häufig als Referenzwert für die Verdunstungskraft des Klimas.

- Die **aktuelle Evapotranspiration** (ET_a) ist die tatsächliche Verdunstung von Pflanzenbeständen einschließlich der Verdunstung der Bodenoberfläche. Sie kann in unbewässerten Lysimetern näherungsweise bestimmt werden.
- Die **potentielle Evapotranspiration** (ETP) ist die hypothetische Verdunstung von Pflanzenbeständen unter der Annahme stets optimaler Wasserversorgung. Sie ist eng mit E_0 korreliert (z.B. $ETP \approx 0,75 E_0$; nach PENMAN, 1948) und kann mit speziellen Formeln berechnet (z.B. THORNTHWAITE, 1954; TURC, 1961) oder mittels bewässerter Lysimeter gemessen werden.



Da Verdunstungsmessungen selten und oft ungenau, Verdunstungsberechnungen aber meist aufwendig sind und zahlreiche Daten voraussetzen, wurde schon früh versucht, hygrothermische Indizes auf der Basis von Temperaturwerten und Niederschlägen zur Bestimmung der Humidität bzw. Aridität eines Klimas oder einzelner Monate heranzuziehen.

Einer davon ist der Ariditätsindex nach DE MARTONNE, der von LAUER (1952) in seinen richtungsweisenden Arbeiten verwendet wurde. Danach ist ein Monat humid, wenn

$$N > \frac{5(t + 10)}{3} \quad 1)$$

N = Monatsniederschläge
in mm
t = Monatsmittel der
Temperatur

Diese Art der Humiditätsbestimmung ist zwar heute für weite Bereiche wissenschaftlich überholt, kann aber - auch bei unzureichender Datenbasis -

1) umgeformt

zur groben Bestimmung der Anzahl humider Monate verwendet werden.¹⁾

Neben der absoluten Höhe spielt der Charakter der Niederschläge eine bedeutende Rolle (Verteilung, Verlässlichkeit, Intensität).

Niederschlagsverteilung und -verlässlichkeit:

Aus der jährlichen Verteilung der Niederschläge ist in etwa die Dauer der Vegetationszeit landwirtschaftlicher, annueller Kulturen zu erkennen.

Aus Walter-Diagrammen (siehe unten), in denen die mittleren monatlichen Temperaturen und Niederschlagswerte mit unterschiedlichem Maßstab dargestellt sind²⁾, lassen sich die relativ humiden und die relativ ariden Monate für jeden Standort ablesen. Die Diagramme geben die realen Verhältnisse in den meisten Fällen zwar nur angenähert wieder; dennoch vermitteln sie ein anschauliches Bild des Auftretens, der Länge (horizontal) und der Intensität (vertikal) humider und arider Jahreszeiten, und sie haben den Vorteil, daß sie für jeden Standort aus den meteorologischen Grunddaten gefertigt werden können (in der Legende zu Abb. 2.1.c fettgedruckt).

Im Klimadiagramm-Weltatlas von WALTER, HARNICKEL und MÜLLER-DOMBOIS (1975) finden sich derartige Klimadiagramme für eine Vielzahl von Stationen.

- 1) Nach Vergleichen von LAUER/FRANKENBERG liegt die so gefundene Zahl humider Monate meist etwas höher als die durch Verdunstungsberechnungen gewonnenen Angaben.
- 2) Das Verhältnis von 10°C zu 20 mm Niederschlag basiert auf empirischen Werten, und die Temperaturkurve ersetzt dabei die Kurve der potentiellen Evaporation. Mit der Niederschlagskurve zusammen drückt sie näherungsweise die Wasserbilanz aus.

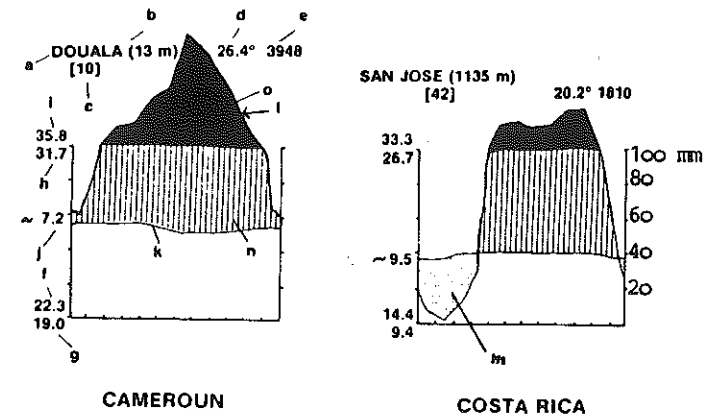


Abb. 2.1.c: Klimadiagramme nach WALTER (1964) *

- a) Station
- b) Höhe über dem Meer
- c) Zahl der Beobachtungsjahre (bei 2 Zahlen erste für Temperatur, zweite für Niederschläge)
- d) mittlere Jahrestemperatur
- e) mittlerer jährlicher Niederschlag
- f) mittleres tägliches Minimum des kältesten Monats
- g) tiefste gemessene Temperatur
- h) mittleres tägliches Maximum des wärmsten Monats
- i) absolutes Maximum (höchste gemessene Temperatur)
- j) mittlere tägliche T-Schwankung
- k) Kurve der mittleren Monatstemperaturen (1 Skalenteil = 10°C)
- l) Kurve der mittleren monatlichen Niederschläge (1 Skalenteil = 20 mm)
- m) Dürrezeit (gepunktet)
- n) humide Jahreszeit (schraffiert)
- o) mittlere monatliche Niederschläge, die 100 mm übersteigen (1 Skalenteil = 100 mm), schwarze Fläche

* Damit gleiche Jahreszeiten grafisch vergleichbar dargestellt werden, beginnt das Jahr auf der Nordhalbkugel im Januar, auf der Südhalbkugel im Juli

In Douala handelt es sich um einen ganzjährig humiden Standort. In San José ergibt sich dagegen eine Dürrezeit von Ende Dezember bis Mitte April, denn in diesem Bereich verläuft die Niederschlagskurve unter der Temperaturkurve.

Je nach dem Verhältnis von humiden Monaten zu ariden Monaten unterteilt LAUER (1975) die Klimate der Tropen in

- a) humide Klimate: 9,5 - 12 humide Monate (0 - 2,5 aride Monate)
- b) semihumide Klimate: 7 - < 9,5 humide Monate (2,5 - 6 aride Monate)
- c) semiaride Klimate: 2 - < 7 humide Monate (6 - 10 aride Monate)
- d) aride Klimate: 0 - < 2 humide Monate (10 - 12 aride Monate)

Es existieren auch andere Unterteilungen der Humiditätsklassen, von denen hier nur noch eine beispielhaft angeführt ist.

Für Westafrika wird am International Institute of Tropical Agriculture (IITA) eine agroklimatische Humiditätsklassifizierung mit folgender Einteilung verwendet (nach LAWSON, 1979 in IITA, 1981):

- a) perhumid: > 8 humide Monate ($N > ETP$)
- b) humid: 6-8 humide Monate
- c) Übergang von humid zu subhumid: 5-6 humide Monate
- d) subhumid: 4-5 humide Monate
- e) semiarid: 2-4 humide Monate
- f) arid: 1-2 humide Monate
- g) Wüste: ≤ 1 humider Monat

Da annuelle Kulturpflanzen in der Anfangsphase nur ca. die Hälfte der potentiellen Verdunstung benötigen, wird der Beginn der Vegetationsperiode oft bereits bei $N > 0,5 ETP$ angenommen und nicht erst bei $N > ETP$ wie bei der klimatisch humiden Periode (s. Abb. 2.1.d).

Am Ende der Vegetationsperiode muß auch noch der im Boden gespeicherte Wasservorrat berücksichtigt werden, weshalb die landwirtschaftlich nutzbare Periode oft länger als die klimatisch humide Periode ist.

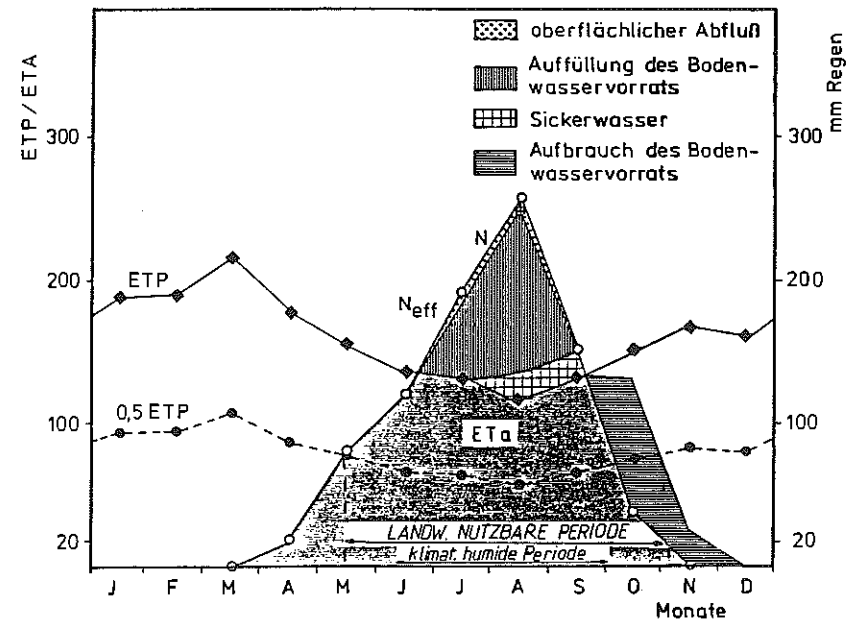


Abb. 2.1.d: Beispiel einer mittleren Wasserbilanz aus der Region Ouagadougou, Trockensavanne

Quelle: nach ROOSE (1981), verändert

1) Bei der Bestimmung der landwirtschaftlich nutzbaren Periode ist auch die Niederschlagszuverlässigkeit (s. u.) wichtig. Dadurch wird in vielen Fällen die tatsächlich nutzbare Periode gegenüber der vereinfachten Darstellung in Abb. 2.1.d verkürzt.

Die Zuverlässigkeit der Niederschläge, die Sicherheit, mit einer bestimmten Regenmenge innerhalb einer gewissen Zeit rechnen zu können, muß bei Anbauempfehlungen und bei der Entwicklung von Anbausystemen, insbesondere bei gleichzeitigem Ziel der Risikominderung, stark beachtet werden. Jahresmittelwerte allein sind unbrauchbar. Sie vermitteln zwar ein grobes Bild von der Situation des Wasserhaushalts in einer bestimmten Region - für den Ackerbau reichen solche Angaben jedoch nicht aus. Schon EVANS (1955) bezeichnete die Niederschlagszuverlässigkeit als den größten Risikofaktor für die landwirtschaftliche Produktion - vor allem auf marginalen Standorten des Regenfeldbaus.

Oftmals treten während der Anbausaison deutliche Trockenperioden auf, die bis zu mehreren Wochen andauern können und die die Erträge deutlich verringern. Aus den mehrjährigen Mittelwerten ist ihr Auftreten in keiner Weise sichtbar (SANCHEZ, 1976).

Das gilt auch für Abweichungen saisonaler, monatlicher oder jährlicher Niederschlagsmengen vom Mittel. Mit absolut abnehmenden Niederschlägen sinkt auch die Zuverlässigkeit der Niederschläge, die mittleren Schwankungen der Niederschläge, die Abweichungen nach oben und unten und damit auch die Risiken nehmen zu (Tabelle 2.1.2). Auf relativ trockenen Standorten ist es deshalb besonders wichtig, möglichst alle Niederschläge in nutzbare Niederschläge umzusetzen. Das läßt sich z.B. durch Verhinderung von Oberflächenabfluß, Förderung der Infiltration, durch Erhalt einer stabilen Bodenstruktur etc. erreichen.

Tab. 2.1.2: Durchschnittliche Abweichungen der Niederschläge vom Jahresmittel in zonaler Sicht (errechnet nach Angaben von WEISCHET, 1979)

Zone	mittlere jährliche Abweichung der Niederschläge vom Mittel in Prozent
I Regenwaldzone	15
I-II Halbimmergrüne Regenwälder	15-20
II Feuchtsavannenregion	20-25
III Trockensavannenregion	um 30

Die maximalen Schwankungen der Niederschläge können noch bedeutend größer sein. Auch können auf zwei Standorten, die beide durchschnittlich 750 mm saisonalen Niederschlag erhalten, im ersten Fall die Werte zwischen 500 und 1000 mm schwanken, während sie auf dem anderen im Mittel nur zwischen 625 und 875 mm variieren, woraus sich eine verschiedene Landnutzung ergibt, obwohl sie im Mittel als 'gleich' einzustufen sind.

Aus langjährigen Klimadaten lassen sich nun Wahrscheinlichkeiten, mit denen eine bestimmte Regenmenge zu erwarten ist, statistisch leicht ermitteln und graphisch darstellen. GLOVER und ROBINSON (1953) beschreiben ein einfaches Verfahren, das für praktische Belange genau genug ist und mit relativ geringem Aufwand eine Vorstellung von den Niederschlagswahrscheinlichkeiten auf einem Standort vermittelt.

Noch einfacher und durchaus gebräuchlich ist ein Verfahren, bei dem die Niederschläge von mehreren Jahren (möglichst 20 oder mehr) nach der Größe geordnet werden. Die Niederschlagswerte einer bestimmten Periode (Jahre, Monate, Dekaden) werden dabei so aufgelistet, daß die höchsten Niederschlagswerte oben stehen, die niedrigsten unten.

Um nun die Niederschlagsmenge zu ermitteln, die in 80 % der Jahre erreicht oder überschritten wird (wurde), zählt man bei z.B. 20 Werten (20 Jahre) von oben 16 Werte ab. Bei gerader Anzahl von Jahren liegt der gesuchte Wert (80 % der Jahre) zwischen dem 16. und 17. Wert (arithmetisches Mittel). Bei ungerader Zahl von Jahresmeßwerten (z.B. 21) ist es der 17. Wert.

Die Aussage lautet dann: In den letzten 21 Jahren fielen mit einer Wahrscheinlichkeit von 80 % x mm Niederschlag oder mehr in einer Periode (Jahr, bestimmter Monat, bestimmte Dekade). Unter der Annahme, daß keine Klimaveränderungen eingetreten sind, ist dies auch in Zukunft zu erwarten.

Beispiel:

Nr.	Jahr	jährl. Niederschlag in mm
1	1952	950
2	1963	940
3	1958	910
4	1969	890
5	1953	860
6	1970	850
7	1964	800
8	1954	780
9	1955	780
10	1962	770
11	1965	750
12	1959	720
13	1960	710
14	1966	700
15	1956	700
16	1971	690
17	1961	660
18	1968	570
19	1967	500
20	1957	480

Gesuchter Niederschlagswert,
der

a) in 80 % der Jahre erreicht oder
überschritten wurde (wird):
 $\hat{=}$ arithm. Mittel aus 16. u. 17. Wert
 $\hat{=}$ $\frac{690 \text{ mm} + 660 \text{ mm}}{2} = 675 \text{ mm}$.

b) in 60 % der Jahre erreicht oder
überschritten wird:
 $\hat{=}$ arithm. Mittel aus 12. u. 13. Wert
 $\hat{=}$ $\frac{720 \text{ mm} + 710 \text{ mm}}{2} = 715 \text{ mm}$

Die Wahrscheinlichkeiten¹⁾ können je nach gewünschter Genauigkeit für beliebig große Zeitintervalle (Jahre, Monate, Wochen) berechnet werden, wobei für landwirtschaftliche Zwecke die Niederschlagsperioden möglichst in 10tägige Abschnitte (Dekaden) aufgelöst werden sollten. Durch Übertragung der Werte bestimmter Wahrscheinlichkeit in eine Graphik ergibt sich ein übersichtliches Bild verschiedener Wahrscheinlichkeitskurven.

In den letzten Jahren sind die Berechnungsverfahren immer wieder verbessert worden, und für viele Gebiete liegen heute schon Niederschlagswahrscheinlichkeitskarten vor, die eine wertvolle Hilfe für die landwirtschaftliche Landnutzungsplanung darstellen.

1) Nach WEBSTER und WILSON (1966) sollte die Wahrscheinlichkeit, daß eine ausreichende Regenmenge für eine Kultur zur Verfügung steht, mindestens 80 % betragen (je nach finanziellem Risiko genügt auch weniger).

JAETZOLD und SCHMIDT (1982) haben in jüngster Zeit aus der Verrechnung von Niederschlagsdaten mit Wasseransprüchen von Kulturpflanzen sogar Ertragswahrscheinlichkeitskarten erstellt, die von sehr großem Nutzen bei der Landnutzungsplanung sind.

Angaben der Bauern bezüglich des Klimas und der Niederschläge liefern weitere wichtige Informationen, denn nur sie geben Auskunft über die kleinräumlichen Verhältnisse, die vom weiten Netz der Wetterstationen nicht erfaßt werden können. Außerdem bieten die subjektiven Darstellungen der Wetterereignisse Einblicke in sonst wichtige Standortfaktoren und Betriebsabläufe, die aufs engste mit den Niederschlägen verknüpft sind. Siehe hierzu auch MANNING (1950), YNIGUEZ und SANDOVAL (1966), JACKSON (1982).

Die Heftigkeit der Niederschläge stellt für den Ackerbauer in den Tropen ein Problem dar, das besondere Maßnahmen zum Schutz der Bodenfruchtbarkeit erfordert. Wolkenbrüche und Regengüsse von bis zu 80 mm pro Stunde sind in den Tropen durchaus keine Seltenheit. In Uganda (Namu-longe) machen sie etwa 25 Prozent der jährlichen Niederschlagssumme aus; 9,4 Prozent der Niederschläge erreichten sogar eine Intensität von über 140 mm pro Stunde, die zwischen 5 und 40 Minuten andauerten (WEBSTER und WILSON, 1966).

Licht:

Was den Faktor Licht anbelangt, zählen die Tropen zu den begünstigten Gebieten. Neigung der Erdachse, "dünnere" Atmosphäre und ganzjährige Vegetationsmöglichkeit im Hinblick auf die Temperatur bewirken, daß die Tropen eine höhere photosynthetische Produktion aufweisen als irgendeine andere Region der Erde. In den Tropen gelangen bis zu 56 Prozent des Lichtes durch die Atmosphäre, in 40° Nord noch 46 Prozent und in 60° Nord nur noch 33 Prozent. In Abhängigkeit vom Grad der Bewölkung (der Jahreszeiten) treten jedoch auch hier Schwankungen auf, die in den wechselfeuchten Tropen jahreszeitlich (in den immerfeuchten Tropen andauernd) zu verminderter Einstrahlung führen.

Tabelle 2.1.3 zeigt die Lichtverhältnisse an drei tropischen und einem gemäßigten Standort.

Tab. 2.1.3: Mittlere monatliche Sonnenstrahlung auf mehreren Versuchstationen (in Langleys/Tag) nach SANCHEZ (1976)

Monat	Yurimaguas, Peru, 2087 mm/J. (trop. Regenwald)	Los Banos, Philippinen, 1847 mm/J. (Monsonklima)	Lambayeque, Peru, 19 mm/J. (Wüste)	Ithaca, N.Y., U.S.A., 766 mm/J. (gemäßigtes Klima)
Januar	308	295	487	136
Februar	309	361a	498	214
März	232	379a	482	273
April	283	492a	456	359
Mai	249	439a	405	470
Juni	265	377	355	515
Juli	342	383	321	492
August	324	403	378	412
September	345	333	435	345
Oktober	379	355	481	242
November	326	312	484	107
Dezember	309	253	503	106
Im Jahresdurchschnitt pro Tag	306	366	440	306

a) Trockenzeit; 1 Langley = 1 Gramm-Kalorie/cm²

Die jahreszeitlichen Schwankungen der Einstrahlung in den Tropen haben deutliche Auswirkungen auf den Ertrag der Bestände (z.B. Reis unter verschiedenen Bewölkungsgraden). DE WIT (1967) errechnete aus den Temperaturwerten (Länge der Vegetationszeit) und der Lichtmenge das Ertragspotential verschiedener Standorte und kommt für tropische Standorte auf eine etwa doppelt so hohe potentielle Produktivität wie für die gemäßigten Klimate (Tab. 2.1.4).

Trotz durchaus kritisierbarer Werte (Wasser usw.) sind die Größenordnungen doch aussagekräftig genug, um daran die Forderung zu knüpfen, daß die Landwirtschaft aufgerufen ist, dieses Potential auszuschöpfen. Mischkulturen und stufenartiger Vegetationsaufbau (siehe Kap. Vegetationsgestaltung), Verbesserung des Wasserhaushalts der Böden usw. können in diesem Sinne wirksam werden und erlauben uns die Nutzung der Res-

source (Sonnenlicht), die als einzige kostenlos und unerschöpflich ist.

Tab. 2.1.4: Die potentielle Produktivität in verschiedenen Breitengraden berechnet nach Temperatur und Lichteinstrahlung (nach DE WIT (1967) in SAN PIETRO, 1967)

°nördlicher Breite	Monate über 10°C Mitteltemperatur	Kohlenhydratproduktion pro ha und Jahr in t
70	1	12
60	2	21
50	6	59
40	9	91
30	11	113
20	12	124
10	12	124
0	12	116
-10	12	117
-20	12	123
-30	12	121
-40	8	89
-50	1	12

Spezielle Klimacharakteristika:

Klimakennzahlen wie Jahresniederschläge, Sonnenscheindauer etc. liefern wichtige Orientierungsdaten - eine genauere Betrachtung der Klimafaktoren (Niederschlagsintensität, Anteil an diffuser Strahlung etc.) ist aber meistens notwendig, um zum optimalen Anbausystem zu finden.

Mischkulturen zum Beispiel sind nicht nur den extremen Niederschlagsverhältnissen der Tropen besser angepaßt (Bodenbedeckung) als Reinkulturen, sondern auch den besonderen Strahlungsverhältnissen, denn der hohe Anteil diffuser Strahlung vermindert den Licht-Schatten-Kontrast und damit Expositionsunterschiede im Lebensraum der Pflanzen (Abb. 2.1.e).

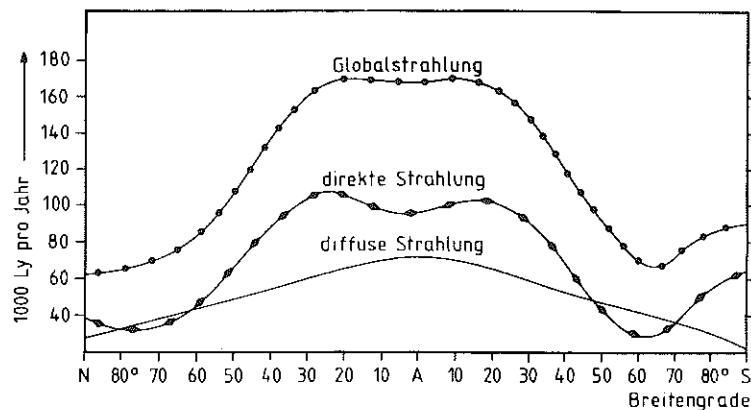
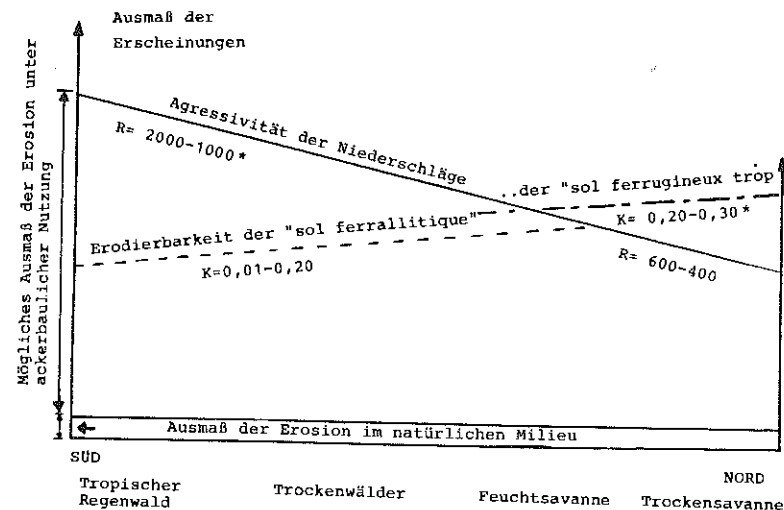


Abb. 2.1.e: Meridionalprofil der Jahressummen der Globalstrahlung und ihrer Komponenten. (Nach SELLERS, 1965, zit. in WEISCHET, 1979)

Abbildung 2.1.f gibt die Aggressivität von Niederschlägen wieder, die auch innerhalb der Tropen stark unterschiedlich ist (hier anhand eines Profils von Abidjan (Elfenbeinküste) bis nach Obervolta hinein.)

Die Erosion bleibt in natürlichem Milieu nahezu konstant gering. Während die Aggressivität der Niederschläge bei zunehmender Trockenheit abnimmt, nimmt die Erodierbarkeit der Böden zu. Bei Ackerkulturen schwankt das mögliche Ausmaß der Erosion deshalb in weiten Grenzen und beträgt im Vergleich zum natürlichen Milieu unter Umständen ein Vielfaches (Pfeile in Abb. 2.1.f., linker Rand).



* Die Werte R und K sind normierte, standardisierte Meßwerte (Indexzahlen), die die erosionsfördernden Charakteristika der Niederschläge (R = Rainfall and Runoff Factor) und der Erodierbarkeit der Böden (K = Soil Erodibility Factor) wiedergeben. Sie sind Bestandteil der "Universellen Bodenverlustgleichung" nach WISCHMEIER and SMITH (1978), bei der sich der mittlere jährliche Bodenverlust (A) aus dem Produkt der Faktoren $R \times K \times L$ (Faktor Hanglänge) $\times S$ (Hangneigung) $\times C$ (Bodennutzungsform) $\times P$ (Einfluß angewandter Schutzmaßnahmen) ergibt.

Abb. 2.1.f: Schema der Reaktion von Versuchspartellen auf die Aggressivität der Niederschläge in Abhängigkeit von Klima, Boden und Vegetation (nach ROOSE, 1981)

2.1.2. Die Klassifikation nach KÖPPEN (1936) und reformiertes KÖPPEN-System (KÖPPEN-TREWARTHA-Klassifikation)¹⁾

Die KÖPPEN-Klassifikation war eines der ersten Klassifikationssysteme. Es hat sich in der ganzen Welt weitgehend durchgesetzt und wird im Prinzip auch heute noch verwendet. Die geographische Klimaeinteilung basiert auf homologen Klimaten, die sich allgemein im Flachland aneinanderreihen. Sie ist (wie die folgenden auch) vorwiegend auf die Wirkung des Klimas auf den (natürlichen) Pflanzenwuchs gegründet und unterscheidet 5 große Klimazonen, von denen hier nur die ersten beiden (die tropischen Klimate A und B) behandelt werden.

Tropische Regenklimate (A):

In den A-Klimaten sind alle Monatsmittel der Temperatur größer oder gleich 18° C. Die Feuchteverhältnisse dienen KÖPPEN zur weiteren Differenzierung der tropischen Regenklimate, wobei er sowohl die absolute Niederschlagsmenge als auch deren Verteilung berücksichtigt.

Er unterscheidet (s. Übersicht):

Af-Klimate (f = Fehlen einer Trockenzeit)

mit Regen zu allen Jahreszeiten. Jeder Monat mehr als 60 mm

Am-Klimate (m = Monsun)

mit kurzen Trockenzeiten, in denen die tieferen Bodenschichten stets feucht bleiben, da die Jahresniederschläge hoch sind

Aw-Klimate (w = wintertrocken)

mit Sommerregen. Sie werden auch als Savannenklimate bezeichnet.

As-Klimate (s = sommertrocken)

Seltener Ausnahmefall

Abbildung 2.1.g gibt die Bereiche für die einzelnen A-Klimate wieder.

1) Bei Angaben ist darauf zu achten, welche Klassifikation verwendet wurde.

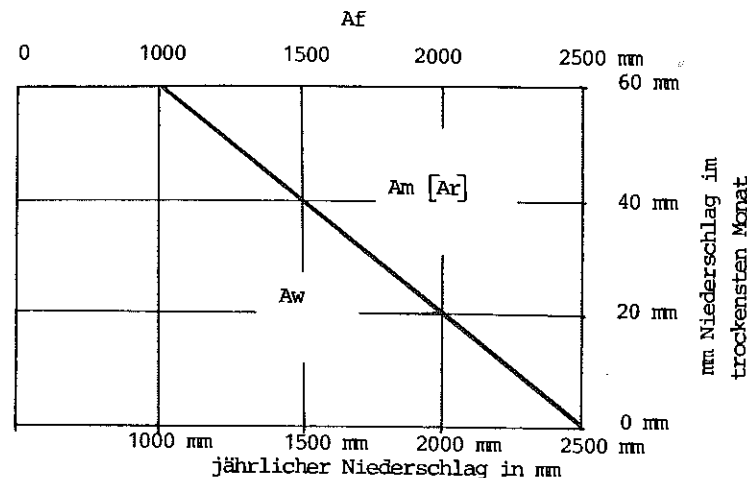


Abb. 2.1.g: Diagramm zur Bestimmung der A-Klimate nach KÖPPEN

Im reformierten System (KÖPPEN-TREWARTHA-Klassifikation) liegt die Temperaturgrenze der A-Klimate bei einem kleinsten Monatsmittel von 17° C. Nach dem Af-Klima wird noch ein Ar-Klima mit 1-3 Monaten unter 60 mm eingefügt [Ar].

Die rechnerische Ermittlung der Abgrenzung zwischen Am- [Ar-] und Aw-Klimaten erfolgt nach der in Übersicht 2.1.1 genannten Formel (1). Bei einem Niederschlag von 20 mm im trockensten Monat müsste der Jahresniederschlag also mindestens 2000 mm betragen, um noch als Am [Ar] klassifiziert zu werden.

Tropische Trockenklimate (B):

In den tropischen Trockenklimaten wird das Leben "in Art und Maß vor allem durch den Wassermangel bestimmt" (KÖPPEN, 1936). Aufgrund geringer Bewölkung (Strahlungswirkungen) sind Tag- und Nachtunterschiede

Übersicht 2.1.1: Gliederung und Abgrenzung tropischer Tieflandklimate nach KÖPPEN bzw. KÖPPEN-TREWARTHA

KÖPPEN (1936)	KÖPPEN-TREWARTHA (1943)	
"Urwaldklima" ¹⁾	Af	Af
Alle Monate mit über 60 mm Niederschlag		
"Monsunklima"	Ar = rainy (1 - 3 Monate < 60 mm)	
	Am	Am
① Grenzformel: $R = 25 (100 - rn)$		
"Savannenklima"	Aw	Aw
Grenzformel:		Grenzformel:
a) bei Sommerregen		
② $R = 20 (t + 14)$		⑥ $R = 20 (t - 10) + \frac{300 RS}{R}$
b) bei verteilten Niederschlägen		
③ $R = 20 (t + 7)$		
"Steppenklimate"	BS ²⁾	BS
Grenzformel:		Grenzformel:
a) bei Sommerregen		
④ $R = 10 (t + 14)$		⑦ $R = 10 (t - 10) + \frac{150 RS}{R}$
b) bei verteilten Niederschlägen		
⑤ $R = 10 (t + 7)$		
"Wüstenklimate"	BW	BW

R: Mittl. Jahresniederschlag in mm; rn: Niederschlag des trockensten Monats; t: Jahresmitteltemperatur; RS: Mittl. Niederschläge des Sommerhalbjahres

- 1) KÖPPENs Originalbezeichnungen, wie sie hier genannt werden, haben heute z.T. eine andere Bedeutung und können daher so nicht weiter verwandt werden. Als "Steppen" bezeichnet man z.B. heute nur noch außertropische Grasländer.
- 2) Da die B-Klimate auch außerhalb der Tropen auftreten, haben tropische B-Klimate normalerweise noch den Index h (= hot).

in der Temperatur ausgeprägter.

Zur Abgrenzung der Trockenklimate von den Feuchtklimaten gibt KÖPPEN folgende Formel an:

Trockenklimate BS (S = "Steppe"), wenn

bei Sommerregen $R < 20 (t + 14)$ ②

bei Regen ohne Periode $R < 20 (t + 7)$ ③

Trockenklimate BW (W = Wüste), wenn

bei Sommerregen $R < 10 (t + 14)$ ④

bei Regen ohne Periode $R < 10 (t + 7)$ ⑤

R: Jahresniederschlag (in mm¹⁾), t: Jahresmitteltemperatur (°C)

Im reformierten KÖPPEN-System (KÖPPEN-TREWARTHA-Klassifikation) sind die Formeln verbessert und berücksichtigen die Verteilung der Niederschläge in Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März)²⁾ (RUDLOFF, 1981). Hier handelt es sich um ein semiarides Trockenklimate BS, wenn:

$$(6) R < 20 (t - 10) + \frac{300 RS}{R}$$

um ein Wüstenklimate BW, wenn:

$$(7) R < 10 (t - 10) + \frac{150 RS}{R}$$

Beispiel: Bei 25° C liegt die Grenze zum BS-Klimate bei 600 mm Jahresniederschlag, wenn alle Niederschläge im Sommer fallen.

Fällt die Hälfte der Niederschläge im Winter, so liegt die Grenze bei 450 mm Jahresniederschlag.

Zur näheren Charakterisierung des Klimas werden im KÖPPEN-System Kleinbuchstaben angehängt (siehe KÖPPEN, 1936, S. 41 bis 43). Dadurch erhält man eine Klimaformel wie z.B. Afax'':

- 1) Ursprünglich hatte KÖPPEN die Formel in cm angegeben. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde sie in mm umgerechnet.
- 2) Auf der Südhalbkugel sind die Jahreszeiten entsprechend vertauscht.

Zunehmende Niederschläge

- A: tropisches Klima
- f: feucht (alle Monate)
- a: mindestens 1 Monat > 22° C
- x'': 2 etwas verschobene Regenzeiten

Im reformierten System sind noch die Buchstaben G für Gebirgsklimate (> 500 mm NN) und H für Hochgebirgsklimate (> 2500 m NN) hinzugefügt. Nach KÖPPEN (1936) werden die Gebirgsklimate der Tropen häufig als C-Klimate (außertropische Klimate) klassifiziert, da die Temperaturgrenze für A-Klimate dort nicht eingehalten werden kann.

Bestimmungsschlüssel für tropische Klimate nach KÖPPEN/TREWARTHA:

1. Ist der Standort über 500 m ü. M.?
ja → 2.
nein → 3.
2. Ist der Standort über 2.500 m ü. M.?
ja → H-Klima
nein → G-Klima
3. Ist $R > 20 (t-10) + \frac{300 RS}{R}$?
ja → 4.
nein → 8.
4. Ist die mittlere Temperatur des kältesten Monats > 17° C?
ja → 5.
nein → C-Klima (außertropisch)
5. Haben alle Monate über 60 mm Niederschlag?
ja → Af-Klima
nein → 6.
6. Ist $R > 25 (100-rn)$?
ja → 7.
nein → Aw-Klima

7. Haben mehr als drei Monate unter 60 mm Niederschlag?
ja → Am-Klima
nein → Ar-Klima
8. Ist $R > 10 (t-10) + \frac{150 RS}{R}$?
ja → BS-Klima
nein → BW-Klima

Erklärungen:

R: Mittl. Jahresniederschlag in mm; rn: Niederschlag des trockensten Monats; t: Jahresmitteltemperatur; RS: Mittl. Niederschläge des Sommerhalbjahres

2.1.3. Die Zonierung nach WALTER (1964, 1979)

Die Zonierung nach WALTER (1964, 1979) ist eine stark geobotanisch, vegetationsökologische Klassifizierung. WALTER (1964, 1979) unterteilt die Tropen in sogenannte "Biome", worunter er "einen großen einheitlichen Lebensraum innerhalb der "Geo-Biosphäre"" versteht. Er geht dabei stark auf die Wechselbeziehungen zwischen Boden, Klima und Vegetation ein und unterscheidet - je nach Einfluß der einzelnen Faktoren - typische zonale Lebensräume, die er als "Zonobiome" (einheitliches Lebensformenspektrum) oder "Zono-Ökotope" (Übergangsformen) bezeichnet. Standorte, die durch spezielle Bodenmerkmale (z.B. Sand, Salz), durch Relief oder Wasser charakterisiert sind, nehmen eine Sonderstellung ein. Sein System ergibt sich aus den in Abbildung 2.1.h dargestellten Beziehungen.

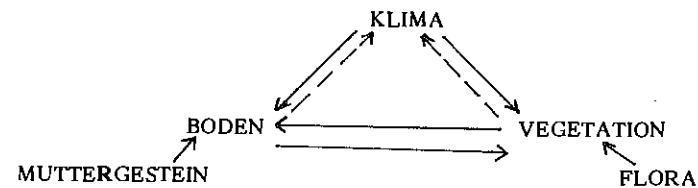


Abb. 2.1.h: Interaktionen zwischen Klima, Boden und Vegetation (nach WALTER, 1964)

Die stark vegetationsökologische Betrachtung hat zur Folge, daß der quantifizierbare Rahmen in weiten Grenzen schwankt und daher zur schnellen Orientierung weniger geeignet ist als etwa die Klassifikation nach KÖPPEN (1936) oder LAUER.¹⁾ Zum Vergleich standörtlicher Klimate verwendet WALTER (1964, 1979) Klimadiagramme (siehe unten).

Er unterteilt die Weltklimate in 9 große Zonobiome, von denen 2 (3) in die Tropen fallen.

Zonobiom I - Äquatoriales Tageszeitenklima (Immergrüner tropischer Regenwald):

Ungefähre quantitative Bereiche der Klimafaktoren:

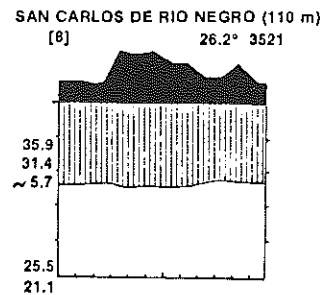
Niederschläge: meist ≥ 2000 mm pro Jahr

Niederschlagsverteilung: Monate mit < 100 mm gelten schon als relativ trocken. 10-12 humide Monate (0-2 trockene Monate)

Es ist die Zone des konstanten äquatorialen Klimas, das ganzjährig nur geringe Schwankungen der Niederschläge aufweist (1-2 Perioden mit etwas weniger Niederschlägen).

Auch in dieser Zone können Wochen ohne Niederschläge auftreten.

Das Klimadiagramm von San Carlos de Rio Negro (Venezuela) ist typisch für diese Zone:



VENEZUELA

1) Das komplexe Zusammenwirken der Faktoren Vegetation, Klima und Boden wird dafür um so deutlicher. Dies sind auch die Faktoren, die für die agrarwirtschaftliche Beurteilung eines Standorts bedeutend sind.

Ungefähre Bereiche einiger Klimadaten:

Temperaturen: Jahresmittel um 25° C - 27° C

Temperaturschwankungen: Tag - Nacht: 2° C (bedeckt) bis 10° C (klar)

Monatsmittel: 1-2° C

Relative Luftfeuchte: um 6.00 Uhr meist ≥ 90 Prozent

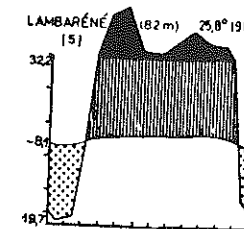
um 13.00 Uhr ≤ 70 Prozent

Evaporation (E_0) etwa 2-4 mm/Tag (im offenen Gelände auch höher)

Zonoökoton I/II - Übergangzone (halbimmergrüner, tropischer Regenwald)

Die Zone des halbimmergrünen Regenwaldes nimmt eine Zwischenstellung zwischen dem immerfeuchten Klima und dem wechselfeuchten Klima ein. Die Gebiete liegen bis etwa um den 10. Breitengrad. Die Trockenperiode der "winterlichen" Jahreszeit ist schon ausgeprägter, während die sommerliche zurücktritt.

Lambaréné im Kongo weist ein solches Klima auf.



Ungefähre Bereiche einiger Klimadaten:

Temperaturen: Jahresmittel 24° C - 27° C

Temperaturschwankungen: Monatsmittel: 2 - 4° C

Tag - Nacht: 5 - 10° C

Niederschläge: 1500 - > 2000 mm/Jahr

Niederschlagsverteilung: (8) 9-10 humide Monate

Evaporation (E_0): 2 - 4,5 mm/Tag

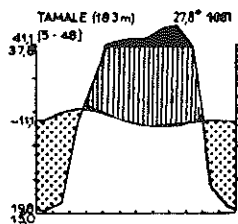
Relative Luftfeuchte: jahreszeitlich verschieden: Regenzeit 70 - 100 %

Trockenzeit 60 - 90 %

Zonobiom II - Tropisches Sommerregenklima (Zone der laubabwerfenden Wälder)

Das Klima in dieser Zone ist geprägt durch eine warme, feuchte bis per-humide Sommerjahreszeit und eine dürre Trockenjahreszeit, in der die Temperaturen zur Regenzeit hin ansteigen. Deutlicher Jahresrhythmus der Vegetation und des Lebens (Vegetation, Bodenleben, Tiere).

Tamale in Nord-Ghana ist ein Beispiel für ein solches Klima.



Ungefähre Bereiche einiger Klimadaten:

Niederschlagsmenge (absolut) und Regenzeiten (Dauer) können sich in dieser Zone teilweise kompensieren - vorausgesetzt, das Ökosystem ist zur Wasserspeicherung fähig (Humus, Streu, Wasserkapazität des Bodens).

Temperaturen: Jahresmittel um 25 - 28° C

Temperaturschwankungen: Monatsmittel: 5 - 7° C

Tag - Nacht: um 10° C (8 - 15° C)

Niederschläge: meist 900 mm

Niederschlagsverteilung: 7 - 9 humide Monate

(3 - 5 aride Monate)

Evaporation (E_0): 3 - 5 mm/Tag

Relative Luftfeuchte: jahreszeitlich verschieden: Regenzeit 70 - 100 %

Trockenzeit 20 - 50 %

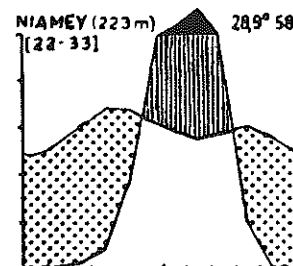
Zonoökoton II/III - Klimatische Savannen (Strauch- und Grasländer)

Unter klimatischen Savannen, die nach WALTER (1964) aus ökologischer Sicht unbedingt von anthropogenen und edaphischen (durch spezielle Böden bedingte) Savannen zu trennen sind, versteht er einen Vegetationstyp, der sich innerhalb relativ weiter Bereiche in der Zone zwischen laubabwerfenden Feucht- und Trockenwäldern und den Wüstenklimaten ausbilden kann. (Das typische Gras- und Strauchland, vereinzelt von Bäumen und Baumgruppen durchsetzt, bildet sich am ehesten um den Bereich von etwa 500 bis 600 mm Jahresniederschlag aus.)

Typisch für dieses Klima ist ein deutlicher Anstieg der Temperaturen vor Beginn der Sommerregen.

Die langjährigen Niederschlagsmittel haben eine hohe Variabilität (Unzuverlässigkeit).

Das Klimadiagramm von NIAMEY (Niger) ist hier als Beispiel für den Klimatypus dargestellt.



Ungefähre Bereiche einiger Klimadaten:

Jahresmittel: 26° C - 29° C

Temperaturschwankungen: Monatsmittel: 10 - 12° C

Tag - Nacht: um 16° C (10 - 20° C)

Niederschläge: 400 - 700 (900) mm/Jahr

Niederschlagsverteilung: 3,5 - 5 humide Monate

Evaporation (E₀): 3,5 - 7 mm/Tag

Relative Luftfeuchte: jahreszeitlich verschieden: Regenzeit: 60 - 90 %

Trockenzeit: 10 - 50 %

Zonobiom III - Wüsten (und Halbwüsten)

Zonen, die weniger als 3 bis 4 humide Monate aufweisen und weniger als 300 (200 - 400) mm Niederschlag erhalten, werden von WALTER (1964) als Wüstenklimate bezeichnet.

Die Gebirgsklimate nehmen bei WALTER eine Sonderstellung ein und werden als Gebirgslebensräume (Orobiome) bezeichnet.

2.1.4. Klassifikation nach HOLDRIDGE

In der Klassifikation von HOLDRIDGE (1967), die ebenfalls eine an den Vegetationsformationen orientierte Klassifizierung anstrebt, werden Höhen- und Breitenzonen gleichrangig gebraucht.

Durchschnittliche Jahrestemperatur, jährliche Niederschläge und die potentielle Evapotranspiration (gemessen an freier Wasseroberfläche) gehen in das Klassifikationssystem ein.

Die Verteilung der Niederschläge wird überhaupt nicht berücksichtigt. Das hat zur Folge, daß etwa die Grasländer der Llanos in Südamerika in der gleichen Zone erscheinen wie der Regenwald im Amazonasbecken, wobei allerdings auch noch Bodeneinflüsse mitspielen.

Die Klassifikation, die oft in Südamerika gebraucht wird, ist deshalb für die Landwirtschaft, für welche die Verteilung der Niederschläge

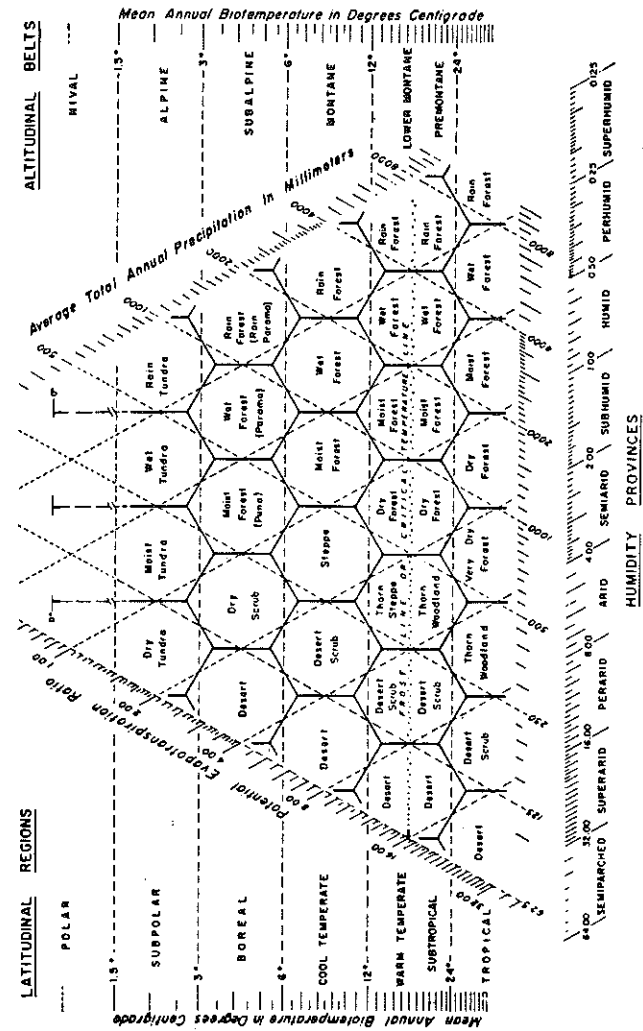


Abb. 2.1.i: HOLDRIDGE's Klassifikation der Lebenszonen (Life-zones) bzw. der Pflanzenformationen (HOLDRIDGE, 1967)

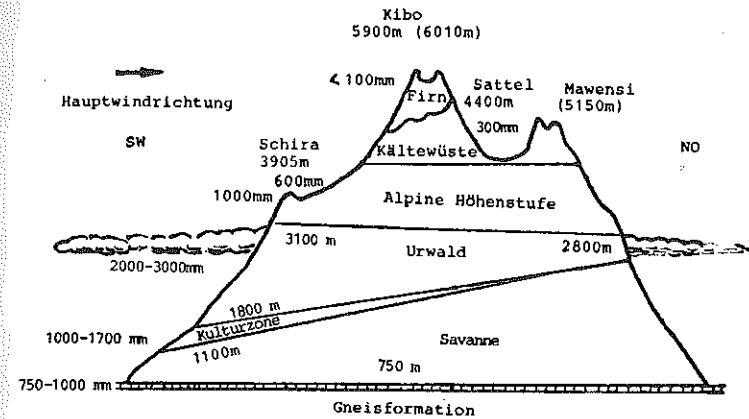


Abb. 2.1.j: Schematisches Vegetationsprofil durch den Kilimandscharo mit Angaben der ungefähren jährlichen Niederschlagsmengen (in Millimeter) in verschiedenen Höhen (WALTER, 1964).

Wegen des gleichmäßigen jahreszeitlichen Temperaturverlaufs bestimmen Niederschlag(-sverteilung), Luftfeuchte und Wasserhaushalt auch in den tropischen Gebirgslagen den Gang oder die Konstanz der Jahreszeiten. Hinzu kommen, spezielle thermische Verhältnisse (z.B. starke Nachtabkühlung durch Ausstrahlung), besondere Strahlungsverhältnisse¹⁾ und die Wirkungen der Reliefausprägung, die lokal starken Einfluß auf die standörtlichen Verhältnisse nehmen. Das führt zu ökologischen Lebensgemeinschaften, die nicht mit denen der zunehmend kühlen Klimate in Nord-Süd-Abfolge vergleichbar sind. Deutlich wird dieser Sachverhalt am Beispiel des Maisanbaus. Bei gleichem Jahresmittel von Bogotá (14,5° C) und einem Standort in Europa braucht der Mais unter dem hiesigen Sommer etwa 5 Monate bis zur Reife, in Bogotá dagegen, bei allgemein längerem Wachs-

1) In tropischen Hochgebirgslagen, insbesondere aber in den Randtropen, ist der Anteil direkter Strahlung bei klarem Himmel sehr hoch, Licht-Schatten-Kontraste sind sehr ausgeprägt und führen zu deutlichen Expositionsunterschieden in der Vegetation (WEISCHET, 1979). In den inneren, d.h. feuchten Tropen wird dieser Effekt durch die hohe Luftfeuchte, vor allem aber durch den Einfluß der Bewölkung zunehmend überdeckt.

tum zum Erreichen der Wärmesumme und großen Tag-Nacht-Schwankungen der Temperatur, 9 bis 11 Monate.

Die Hangneigung nimmt starken Einfluß auf das lokale Standortklima, wobei in den inneren Tropen Ost- und Westhänge unterschieden werden müssen. Osthänge werden länger von der Sonne beschienen, da erst gegen Mittag die Bewölkung auftritt.

Die Vegetation wirkt ausgleichend auf den Temperaturgang der bodennahen Luftschichten. (Durch Überbauung von Kaffee mit Bäumen (*Inga* sp.) kann der Kaffee in Kolumbien bis in Höhen von nahezu 2000 Metern vordringen.)

Ein weiterer wichtiger Faktor ist auch der Charakter des Gebirges. An Einzelbergen werden die Anbaugrenzen wesentlich früher erreicht als in großen Landmassenerhebungen. So kommt Kaffee in den Kamerunbergen nur bis 1200 Meter ü.M. vor, während er in den Tropen Südamerikas bis auf fast 2000 Meter Höhe zu finden ist (TROLL, 1959).

Nach oben hin sind die Anbaugrenzen, analog den Waldgrenzen, vor allem durch die niedere Lufttemperatur und die Niederschlagsverhältnisse bestimmt (TROLL, 1966).

WALTER (1979) hebt vor allem die Bedeutung der Bodentemperatur als limitierenden Faktor hervor (Wurzelwachstum usw.). Die Bodentemperatur (unter Wald) in 50 cm Tiefe ist in den Tropen ein Maß, welches das Jahresmittel der Temperatur wiedergibt (ebenda).

Klassifikation:

TROLL (1959) teilt die tropischen Höhenstufen ausgehend von den Verhältnissen in Südamerika in 4 (5) Stufen ein (siehe Abb. 2.1.k).

In den feuchten Tropen entspricht der **Tierra caliente** (bis ~ 1000 m. ü.M.) die Vegetationsstufe des tropischen Tieflandregenwaldes.

Der **Tierra templada** (etwa ab 1000 m ü.M.) entspricht der tropische Bergwald ("Tropical lower montane forest"). Die Zone ist noch völlig frostfrei, und Kaffee, Tee und zahlreiche Früchte und Fruchtbäume sind typisch für diese Zone (meist hohe konvektive Niederschläge).

In der **Tierra fria** (etwa ab 1800 bis 2300 m ü.M.) findet sich der tropische Höhen- und Nebelwald (Tropical upper montane forest) als typische

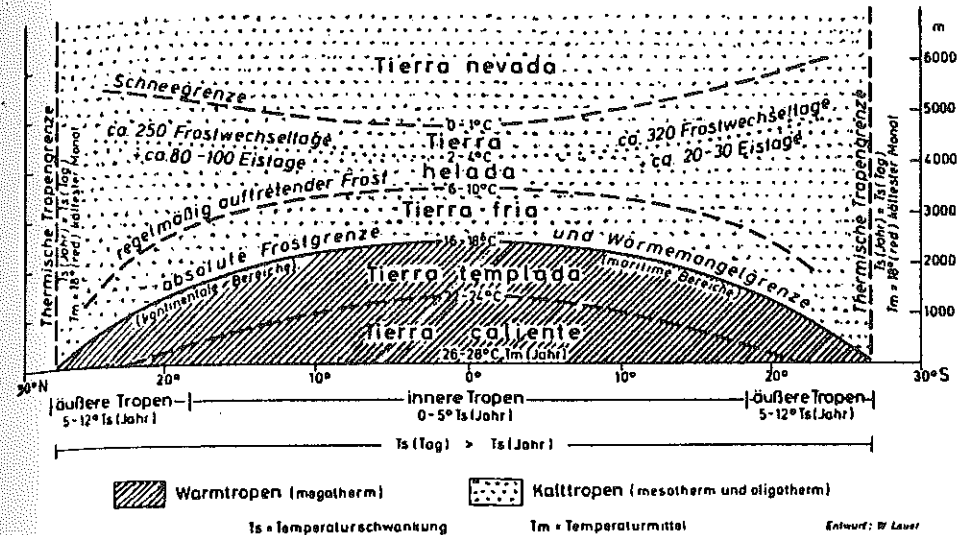


Abb. 2.1.k: Schematische Darstellung der Höhenabstufung in den Tropen (nach LAUER, 1975)

Vegetation. In dieser Zone muß schon mit vereinzelt Frösten gerechnet werden. Häufig sind Kulturpflanzen anzutreffen, wie sie auch in den gemäßigten Zonen zu finden sind.

Die Wälder sind gekennzeichnet durch die nach oben abnehmende Temperatur und zunehmende Feuchte. Epiphyten, Farne, Moose und Bambus (letztere vor allem in Afrika) sind ein Kennzeichen der meist dicht geschlossenen Wälder, die beachtliche Teile ihres Niederschlags aus den Ne-

belwolken "auskämmen".

Je nach der Feuchte, die in den Niederungen herrscht, treten die Stufen maximalen Niederschlags früher oder später auf (siehe Abb. 2.1.1), d.h. in feuchten Klimaten treten die Steigungsregen und die Wolkenstufen tiefer auf (in Kolumbien schon etwa zwischen 1000 und 1500 m ü.M.), in mehr trockenen Gebieten erst auf höherer Stufe (in Äthiopien bei 1800 bis 2500 m ü.M.).

An die Tierra fria schließt sich die Tierra helada an, die subnivale Zone mit der Páramo-Vegetation und den tropischen Höhengrasländern.

Nach der Humidität und der Höhenlage ergibt sich daraus die in Abb. 2.1.m dargestellte Gliederung der tropischen Höhenklimate, die zugleich eine vegetationsökologische Gliederung darstellt.

Die Höhenklimate nach HOLDRIDGE (1967) ergeben sich aus der Darstellung 2.1.i)

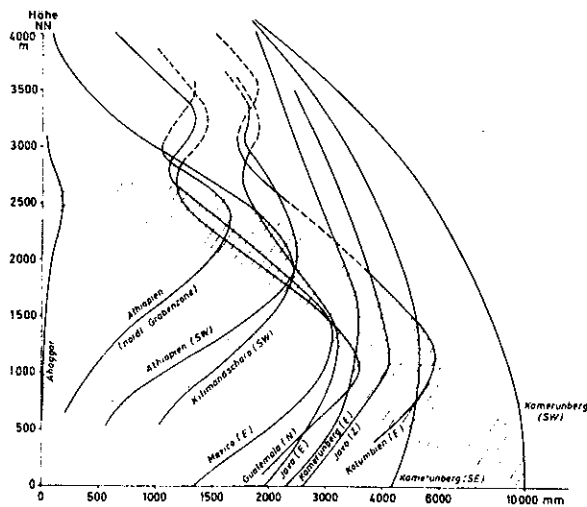


Abb. 2.1.1: Jährliche Niederschlagssummen verschiedener Gebirgsabdachungen in Abhängigkeit von der Meereshöhe. Schraffierte Fläche = Höhenlage der Maximalstufe (nach LAUER, 1976, zit. in HAFFNER, 1982)

2.1.6. Entwurf einer GTZ-internen klimatischen Zonierung der Tropen und Vergleich verschiedener Klassifizierungssysteme (siehe Übersicht 2.1.2 und Abb. 2.1.m)

Die gewählte klimatische Zonierung der Tropen ist identisch mit der Einteilung nach LAUER (1952), die auch TROLL (1964) für seine Karte der Jahreszeitenklimate der Erde verwandt hat. Sie hat den Vorteil, daß sie relativ leicht zu handhaben ist und sich im deutschen Sprachraum weit verbreiteter Begriffe für die einzelnen Vegetationszonen bedient.

Abgrenzungskriterium ist die Zahl der humiden Monate, die sich nach Untersuchungen von LAUER (1952) in Afrika und Südamerika als geeignetes Kriterium zur Abgrenzung der Vegetationsformationen erwies. Dabei wird die Humidität eines Monats durch den Ariditätsindex nach DE MARTONNE/LAUER (1926/1952)¹⁾

$$N \geq 5 \frac{t + 10}{3}$$

N: Mittl. Monatsniederschlag
t: Monatsmitteltemperatur

definiert, weil Verdunstungswerte nur an wenigen Orten vorhanden sind. Bei Verwendung von Tankverdunstungswerten (E_0) kann er grob mit $N \geq 0,5 E_0$ gleichgesetzt werden. (Die Länge der so definierten humiden Periode kann allerdings nur ganz überschlägig mit der Vegetationsperiode gleichgesetzt werden.)

Mit Hilfe des nachfolgend wiedergegebenen Nomogramms ist es möglich, anhand der mittleren Monatsniederschläge bzw. Monatstemperaturen schnell und ohne zu rechnen die Aridität bzw. Humidität eines Standorts zu bestimmen.

1) umformuliert

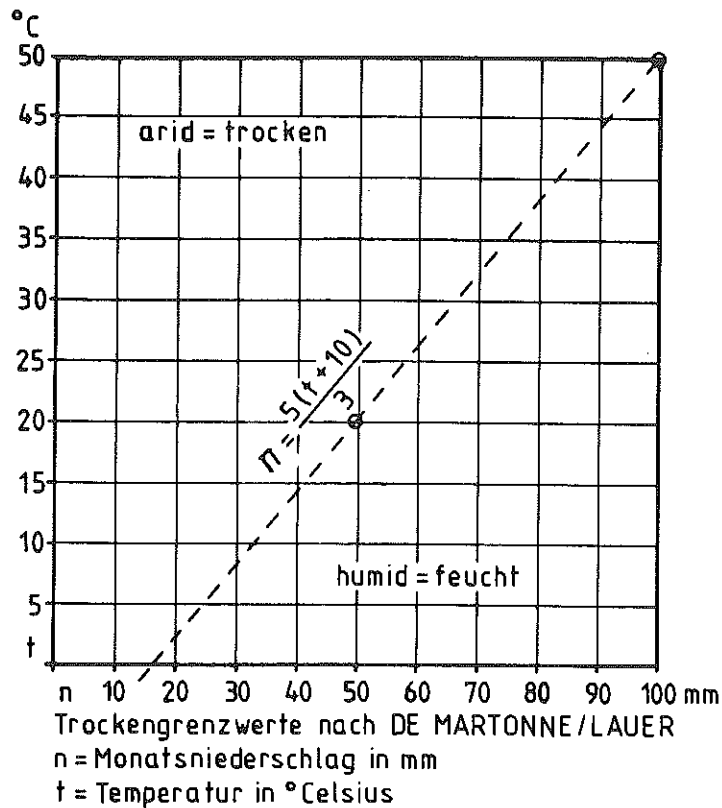


Abb. 2.1.n: Nomogramm zur Bestimmung der Aridität bzw. Humidität der Monate nach DE MARTONNE/LAUER. (Ariditätsindex umgeformt: $12n = 20(t+10) \rightarrow n = \frac{5(t+10)}{3}$)

Noch besser eignen sich Karten zur schnellen Orientierung. In der Karte der "Jahreszeitenklimare der Erde" von TROLL und PAFFEN (1964) sind die Tieflandtropen nach den gleichen Kriterien wie im System von LAUER (1975) gegliedert. Sie ist somit direkt als Übersichtskarte verwendbar (die Bezeichnungen der Klimate (V 1-5) sind etwas anders).

Der Nachteil der Karten (z.B. in MÜLLER, 1982 und in BLÜTHGEN, 1966)¹⁾ ist, daß sie einen sehr großen Maßstab haben (1 : 36 Mio bzw. 1 : 45 Mio), so daß kleinräumliche Verhältnisse oft nur ungenau wiedergegeben sind. Sofern Daten vorhanden sind, sollte der Standort deshalb selbst bestimmt werden.

Die Parallelisierung mit Einheiten anderer Klimaklassifikationen mußte mit großer Vorsicht vorgenommen werden, da die Abgrenzungskriterien ganz unterschiedlich sind. In vielen Fällen mußten daher mehrere Einheiten zur Auswahl gestellt werden, und es bleibt dem Benutzer überlassen, anhand von Klimadaten entweder den eigenen Standort nach dem entsprechenden System zu klassifizieren oder den zu vergleichenden Standort in das verwendete System nach LAUER einzuordnen. Auch die Niederschlagsangaben sollen nur einen ersten Anhaltspunkt geben, da die Höhe des Jahresniederschlags global betrachtet nur unzureichend mit der Zahl der humiden Monate korreliert ist.

Die Höhenklimate wurden einheitlich unter VI klassifiziert, obwohl sie sowohl thermisch als auch hygrisch weiter zu differenzieren wären. Zur thermischen Differenzierung wird die Einteilung nach TROLL (1959) vorgeschlagen, zur hygrischen wäre eine Anlehnung an die Tieflandklimate I-V sinnvoll, wie sie von LAUER (1975) vorgeschlagen wird (siehe Einteilung in Abb. 2.1.m bzw. Übersicht 2.1.2).

1) BLÜTHGEN, J.: Allgemeine Klimageographie (Lehrbuch der Allg. Geogr., Bd. II; 2. Aufl., Berlin, 1966)

2.2. Vegetation

In der folgenden Abhandlung zur Vegetation wird in kurzer Form auf einige Eigenheiten und Charakterzüge tropischer Vegetationsformen eingegangen. Die in vereinfachenden und groben Zügen gehaltene Darstellung, die sich unter anderem mit der Produktivität, der Vielfalt, dem Aufbau und Charakter der Vegetationsformen in verschiedenen ökologischen Zonen befaßt, ist zwangsläufig knapp ausgefallen. Sie kann deshalb den jeweiligen örtlichen Verhältnissen nur sehr bedingt Rechnung tragen und erhebt auch keinen Anspruch auf Wissenschaftlichkeit.

Es geht im folgenden vielmehr darum, auch dem Nicht-Botaniker und Nicht-Ökologen einen Einblick in die Strukturen und Verschiedenheiten tropischer Vegetationsformen zu geben, um aus diesen Darstellungen, aus weiterführender Literatur und aus der eigenen Beobachtung der Natur und ihrer Erscheinungsformen Kenntnisse und Anregungen für die Gestaltung nachhaltiger, standortgerechter Landnutzungsformen zu gewinnen.

2.2.1. Immerfeuchter tropischer Tieflandregenwald

Er bildet sich im äquatorialen Tageszeitenklima auf gut dränenden Böden als typische Formation¹⁾ aus. Trotz verschiedener Artenzusammensetzung gleicht sich die Physiognomie in allen Kontinenten. In der Regel hat er einen 3- bis 4stufigen Aufbau, der mehr oder weniger deutlich ausgeprägt ist.

Die oberste **Baumschicht** ist offen und reicht in Höhen von 35 - 40 Metern (einzelne Exemplare max. 50 - 60 Meter). Sie wird gefolgt von einer relativ geschlossenen Schicht in Höhen von 20 - 25 (30) Metern. Eine dritte Schicht befindet sich auf 10 - 12 Metern Höhe. Sie ist wie die zweite meist stark durch Lianen und andere Klettergewächse verbunden. Die oberen zwei Baumschichten repräsentieren nach Untersuchungen von KLINGE et al. (1975) im Amazonasgebiet bis über 80 Prozent der oberirdischen Biomasse.

1) Formation hier im Sinne von ELLENBERG (1960) als eine Pflanzengemeinschaft mit einheitlichem Lebensformenspektrum und gleicher Physiognomie (= äußerer Erscheinung).

Eine niedere Schicht aus Jungwuchs und Sträuchern schließt das Profil nach unten ab. Die Krautschicht fehlt oder ist nur sehr schwach ausgebildet.

Die Bäume verzweigen sich in der Regel erst kurz unter der Krone; die Stämme sind dünnborkig und haben, insbesondere bei periodischer Nässe, häufig auch Brettwurzeln angelegt.

Die Durchwurzelung ist stark auf den oberen Bodenhorizont konzentriert, nur einzelne Senker sind in mehr als 0,5 - 2 Meter Tiefe noch anzutreffen. Die Streuauflage beträgt nur 1 bis maximal 5 cm. In den obersten 10 cm befinden sich (je nach Bodenart) ca. 20 - 50 Prozent der gesamten Wurzeln. In den obersten 30 cm sind es sogar 80 - 95 Prozent, unter 30 cm noch 5 bis maximal 20 Prozent (WALTER, 1964; NYE and GREENLAND, 1960).

Starke Wurzelkonkurrenz, insbesondere um Nährstoffe, muß angenommen werden, da in natürlichen Wäldern das Gros der aktiven Wurzelmasse nahe der Oberfläche konzentriert ist. In Untersuchungen von HUTTEL (1975) auf einem sandig-schluffigen Tonboden konnte dieser eine nahezu exponentielle Abnahme des Feinwurzelanteils mit der Durchwurzelungstiefe ermitteln.

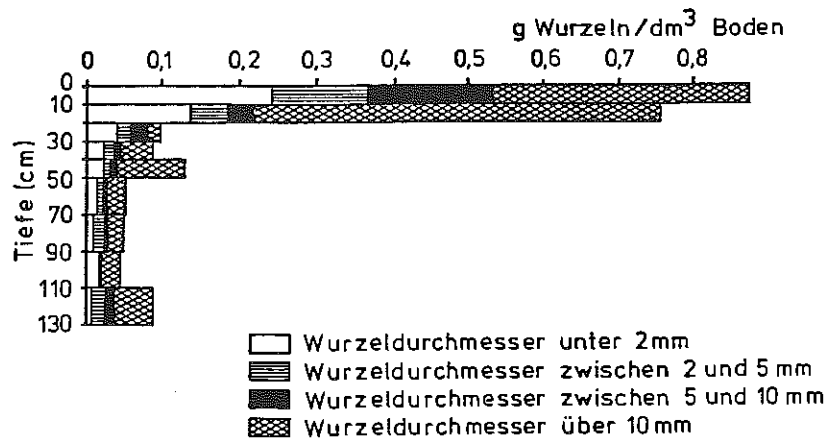


Abb. 2.2.a: Verteilung der Wurzeln verschiedener Größenklassen in verschiedenen Bodentiefen in einem Regenwald der Elfenbeinküste (HUTTEL, 1975)

Nach ihrer Artenzusammensetzung zählen die immerfeuchten Regenwälder zu den vielfältigsten Vegetationsformationen der Erde. Nach WALTER (1974) kommen auf einem Hektar 40 bis 100 Arten vor.

POORE (1968) fand in West-Malaya auf 23 ha 374 Arten (52 Familien, 139 Gattungen), wovon 37 Prozent nur durch ein Individuum vertreten waren (!) (sehr niederer Krautwuchs ausgeschlossen). KLINGE et al. (1975) ermittelten unter Einbeziehung des Unterbaus 500 Arten auf 0,2 ha (mehr als 30 Familien).

Vertreter der gleichen Art stehen also räumlich sehr weit auseinander, und auch in zeitlicher Abfolge wird ihr Standraum in der Sukzession meist von einer anderen Art eingenommen (siehe auch JANZEN, 1973). (Zum Verleich: In ganz New Jersey, USA, zählte HORN (1975) nur 13 Baumarten insgesamt, d.h. Individuen der gleichen Art kommen auf dem gemäßigten Standort in relativ dichten Beständen vor, während die Artenzahlen pro Flächeneinheit relativ gering sind.)

Nach VARESCHI (1980) kann generell gesagt werden, daß für Vegetationsformen, die optimumnah sind (die also kaum durch Trockenheit, Kälte, Staunässe etc. in ihrer Vielfalt beeinträchtigt werden), eine hohe Artenzahl pro Fläche und eine für jede der vielen beteiligten Arten geringe Individuenzahl pro Fläche charakteristisch ist, da der Standort Pflanzen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften und Ansprüchen entgegenkommt.

Umgekehrt zeichnen sich die pessimumnahen Vegetationsformen VARESCHI zufolge durch eine geringe Artenzahl und eine hohe Individuenzahl der betreffenden Arten pro Flächeneinheit aus, da auf einem ungünstigen Standort (z.B. mit langer Trockenheit, mit Frost, mit salzigen Böden oder mit Staunässe) nur relativ wenige Spezialisten erfolgreich konkurrieren können und deshalb auch mit hoher Individuendichte den Standraum ausfüllen.

Von Natur aus artenarme Vegetationsformen treten demnach sowohl in den Feuchttropen (z.B. Mangrovenwälder) als auch und vor allem außerhalb derselben, z.B. in Halbwüsten oder polarnahen Gebieten, auf: Die Artenvielfalt ist also immer eine Größe, die sich aus den jeweiligen standörtlichen Verhältnissen ergibt.

Die von Natur aus artenreichsten Vegetationsformen treten aber zweifelsohne in den feuchten Tropen auf.

So ermittelte VARESCHI (1980) in den tropischen Regenwäldern Diversitätskennzahlen (bzw. Diversitätskoeffizienten) von 1100 bis über 1500, während die Wälder gemäßigter Klimate nur Diversitätskennzahlen von 600 - 700 aufweisen.¹⁾

Die holzigen Pflanzen dominieren im tropischen Regenwald eindeutig gegenüber den krautigen Pflanzen. Nach WALTER (1964) ist das Verhältnis von holzigen zu krautigen Arten im immerfeuchten Tieflandregenwald etwa 7 : 3, und SCHNELL (1971) ermittelte in Westafrika ein fast übereinstimmendes Ergebnis, wobei er auf einem Areal 975 holzige Arten und 442 krautige Arten zählte, während das Verhältnis auf einem vergleichbaren Areal in Frankreich auf 1 : 10 zugunsten der krautigen Pflanzen verschoben war (73 : 717).

Abb. 2.2.b zeigt schematisch den Aufbau eines tropischen Regenwaldes. Über den Besatz mit Tieren finden sich nur wenige Angaben. WALTER (1979) zitiert Untersuchungen aus einem Regenwald in Thailand, wo die gesamte Zoomasse 23 kg/ha betrug. KLINGE et al. (1975) ermittelten im Amazonasregenwald insgesamt 45 kg/ha oberirdische Zoomasse (30 kg Phytophage, 15 kg Zoophage) und 165 kg/ha (79 %) Zoomasse der Bodenfauna. Etwa die Hälfte der Zoomasse waren Holzfresser (vornehmlich Termiten und Coleopterenlarven).

Der Anteil der Zoomasse an der Biomasse ist nach diesen Untersuchungen, die durch die Unzugänglichkeit des Kronenbereiches allerdings erschwert sind, relativ gering.

1) Die Diversitätskennzahl wurde von VARESCHI (1980) entwickelt, um Vegetationstypen aus verschiedenen Regionen in ihrer Artenvielfalt vergleichen zu können bzw. um einen aussagekräftigen Parameter der Mannigfaltigkeit zu schaffen.

Die Diversitätskennzahl oder der Diversitätskoeffizient ($C_d = a \times f$) ergibt sich als Produkt aus der Anzahl der Arten (a) und der Anzahl der Blattformen bzw. Blattkategorien (f). Die Blattformenkategorien (z.B. Langblatt oder Nadelblatt) werden von VARESCHI deshalb als Zeichen der Mannigfaltigkeit hinzugezogen, weil sie unter ähnlichen Bedingungen oft ähnlich sind, obwohl die Arten verschieden sind. Die Blattkategorien sind dabei sehr stark an die Artenzahl gebunden, aber eben nicht ganz, denn es gibt auch Pflanzen mit verschiedenen Blattformen (heterophylle Arten) oder unterschiedliche Arten mit gleichen Blattformen (z.B. Nadelbäume), so daß die Blattformenzahl, auch für sich genommen, ein Maß für die Vielfalt einer Vegetation darstellt. Beispiel: Eine extrem artenarme Heidevegetation in Norddeutschland setzt sich aus 6 Arten und insgesamt 4 Blattformen zusammen und hat eine Diversitätskennzahl (C_d) $6 \times 4 = 24$.

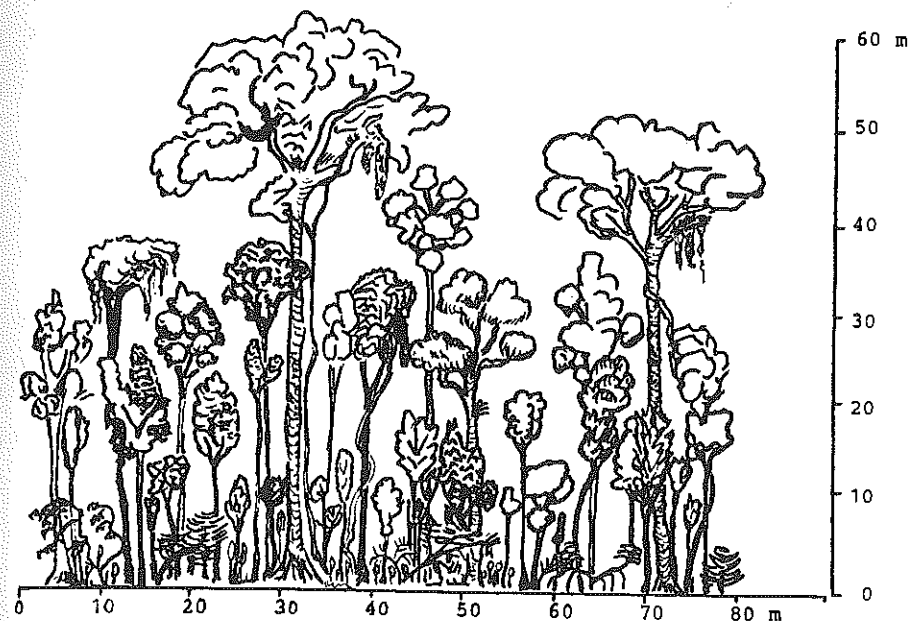


Abb. 2.2.b: Ansicht eines tropischen Regenwaldes in Borneo (gezeichnet nach VARESCHI, 1980)

Produktivität und Charakter des tropischen immergrünen Regenwaldes sind einzigartig.

Bezüglich der Bruttoprimärproduktion weist diese Formation die höchsten Werte auf. Durch die hohen Temperaturen der Nacht sind jedoch auch die Atmungsverluste besonders hoch, was dazu führt, daß die hohe Bruttoproduktivität zu etwa 75 Prozent (WALTER, 1979) wieder veratmet wird.

Die folgenden Angaben zum Produktionsniveau richten sich vorwiegend nach Angaben von WALTER (1979) und NYE und GREENLAND (1960):

Ein optimaler Bestand erreicht pro Jahr eine **Bruttoprimärproduktion** von 120 - 150 t TM/ha.

Der **Blattflächenindex** (BFI)¹⁾ liegt hoch (bei etwa 12).

Die **Nettoproduktion** (= Primärproduktion) erreicht Werte von 30 - 35 t TM/ha, wovon etwa 30 Prozent als Streu anfallen.

Der **Bestand** eines weitgehend "reifen" Regenwaldes umfaßt ein Biomassevolumen von 350 - 450 t TM/ha (bei KLINGE et al., 1975, sind auch Angaben von 500 t TM/ha zu finden).

Ein solcher Bestand, der meist zu über 90 Prozent aus holzigen Teilen besteht, stellt einen beachtlichen Nährstoffspeicher dar. Die Nährstoffe selbst unterliegen einer rasanten Dynamik in einem eng geschlossenen Kreislauf (siehe folgende Zusammenstellung nach NYE und GREENLAND, 1960).

Tab. 2.2.1: Nährstoffe und jährlicher Nährstoffumsatz im tropischen Regenwald (nach NYE und GREENLAND, 1960)

	Nährstoffmengen in kg/ha ²⁾				
	N	P	K	Ca	Mg
Gespeicherte Nährstoffe im trop. Regenwald (Vegetation)	1800	125	800	2500	340
jährliche Umsatzrate in kg/ha	190	13	260	300	60
in Prozent (%)	11	11	32	12	18
jährlicher Zuwachs an Nährstoffen					
a) im rel. Reifestadium (nach 40 J.)	36	2,8	58	60	12
b) in den ersten 5 Jahren	112	6	90	83	-

Auch in einem Sekundärwald übersteigen die zirkulierenden Nährstoffe (Umsatz, Kreislauf) schon nach wenigen Jahren den jährlichen Zuwachs um

1) Blattoberfläche je Einheit Bodenoberfläche

2) NYE und GREENLAND (1960) ermittelten diese Werte annäherungsweise auf einem Standort mit sekundärem, 40 Jahre altem tropischen Regenwald in Ghana.

ein Vielfaches (nach 40 Jahren betrug das Verhältnis von zirkulierenden Nährstoffen zum jährlichen Nährstoffzuwachs in Kade/Ghana für P 13:2,8; für N 190:36; für K 260:58 kg/ha).

Beachtliche Mengen davon werden durch die Niederschläge aus den Blättern direkt ausgewaschen (neben 25 Prozent des zirkulierenden P ist es vor allem das Kalium mit bis zu 196 kg, mehr als 60 Prozent des Umsatzes). Für N gibt BERNHARD-REVERSAT (1975) Werte an, die zwischen 26 und 88 kg N/ha und Jahr liegen.

Der Umsatz von Streu, Laub und Humus verläuft schnell. Die Streuersetzung erreicht Werte von 3,7 Prozent pro Tag, wobei Teile davon vorübergehend zu Humus umgebildet werden (nach NYE und GREENLAND, 1960 etwa ein Zehntel der Bruttoprimärproduktion).

Von den Blättern (2,6 Prozent der stehenden Biomasse) werden ungefähr 80 Prozent pro Jahr umgesetzt, was etwa 4 t Trockenmasse Blattstreu pro Jahr oder 88 kg N, 4,8 kg P und 48 kg K pro Hektar entspricht. (Nach Daten von KLINGE et al., 1975 und NYE und GREENLAND, 1960).

Licht, Wärme und ausgiebige Niederschläge bestimmen also im Zusammenwirken mit einem relativ dicht geschlossenen Nährstoffkreislauf die Produktivität des immergrünen Regenwaldes.

Die Vegetation selbst (und ihr Aufbau, im Verein mit Bodenlebewesen) **bedingt den Erhalt der Produktivität**, wobei NYE und GREENLAND (1960) die folgenden Gesichtspunkte für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit¹⁾ besonders herausstellen:

- a) Die Vegetation fängt einen Teil der einfallenden Niederschläge ab und reduziert durch Evapotranspiration die Perkolation und damit den Ausstrom von Nährstoffen.
- b) Das dichte oberflächliche Wurzelnetz nimmt (unter Beteiligung von Pilzen wie z.B. ektotropher Mykorrhiza bei Dipterocarpaceae und Cesalpiniaceae) die Nährstoffe nach deren Freisetzung (Mineralisierung) unmittelbar wieder auf (P, K, Ca, Mg) (JANOS, 1980).
- c) Nitratverluste treten aufgrund der geringen Aktivität von Nitrifikanten (pH um 5) kaum auf; N liegt fast ausschließlich in der Ammoniumform vor und kann als solches vom Humus sorbiert werden.

1) Der Begriff Standortfruchtbarkeit kommt unter diesen Umständen der Realität näher, da der Boden selbst (Mineralkörper) im Regenwald nur ein geringes Ertragspotential besitzt (siehe Kapitel 2.3.).

d) KLINGE et al. (1975) erwähnen noch die hohe Streuproduktion (hoher Biomasseumsatz) als wichtige Bedingunge für das Funktionieren des Ökosystems.

Alle diese Gesichtspunkte fallen bei wiederholter Shifting-Cultivation (kurzfristig) und bei dauernder Inkulturnahme mit annuellen Kulturen ganz weg (!), so daß das System geschlossener Kreisläufe zerstört wird.

Damit die Nährstoffe, die aus der Vegetation ausgewaschen bzw. aus der Streu mineralisiert werden, nicht verloren gehen, hat sich im tropischen Regenwald ein biologisch funktionierender, kurz geschlossener Nährstoffkreislauf entwickelt, der dies verhindert und zusätzlich noch die Nährstoffe aus dem Regen festhält (BLUM, 1980).

Flechten und Moose und andere Epiphyten filtern schon einen Teil der Nährstoffe aus dem durchfallenden Niederschlag heraus. Die Nährstoffe, die auf und in den Boden gelangen, werden durch das dichte, oberflächliche Wurzelnetz (s.o.) rasch aufgenommen - oft bevor sie überhaupt mit dem Mineralkörper des Bodens in Kontakt geraten.

Hierbei spielt die Mykorrhiza eine sehr wichtige Rolle. Dieser Bodenzpilz ist mit den Pflanzen vergesellschaftet. Er umspinnt die Wurzeln mit seinem Geflecht, wächst in die äußeren Zellschichten der Wurzeln hinein und sendet von hier aus zahlreiche feine Fäden (Hyphen) in die Humusaufgabe und den Boden. Dadurch wird die ursprüngliche Wurzeloberfläche um ein Vielfaches vergrößert, denn mit seinen Hyphen nimmt der Pilz Nährstoffe auf und liefert sie direkt an die Pflanze, die ihrerseits den Pilz mit lebensnotwendigen, energiereichen Photosyntheseprodukten versorgt (siehe auch Kapitel 4.6.).

Wie Untersuchungen von Wasserproben im Amazonasbecken ergaben, ist das so aufgebaute Filtersystem des Regenwaldes äußerst effektiv. Das Wasser aus einem intakten Regenwald ist nährstoffärmer als Regenwasser und entspricht in etwa "leicht kontaminiertem, destilliertem Wasser" (KLINGE et al., 1975).

Der "biologische Filter" verhindert den Nährstoffaustrag aus den extrem sorptionsschwachen, verwitterten Regenwaldböden (sie können kaum Nährstoffe festhalten). Wird die Vegetation beseitigt, wird der Filter zerstört, und der von der Sonnenenergie angetriebene Kreislauf und Umsatz der Nährstoffe über die pflanzliche Biomasse wird gestört. Das schnell versickernde oder oberflächlich abfließende Wasser trägt die Nährstoffe fort.

Die Sukzession nach einer Rodung ist von RICHARDS (1952; zit. in NYE und GREENLAND, 1960) für einen Standort in Afrika beschrieben. Nach der Brandrodung stellen sich zunächst a) Unkräuter und Gräser ein; die Vergrasung wird abgelöst durch b) Buschwerk und schließlich durch c) Bäume, wobei es sich zunächst um typische Vertreter des Sekundärwaldes

handelt.¹⁾

Erst nach etwa 20 Jahren werden diese dann wieder durch langlebige, weniger lichtbedürftige, hohe Bäume verdrängt (falls es überhaupt dazu kommt). Letztere weisen nach JANOS (1980) fast immer enge symbiontische Beziehungen zu Mykorrhiza auf, während die Pioniere in der Sukzession oft keine oder nur eine fakultative Symbiose eingehen.

Mit dem Beseitigen der Vegetation ist auf diesen Standorten in der Regel ein rascher Abbau der Standortfruchtbarkeit verbunden, und die Produktivität sinkt innerhalb von 2 bis 3 Jahren auf weniger als 50 Prozent ihres Ausgangsniveaus.

Diese negativen Auswirkungen auf den Standort sind mehr oder weniger als direkte Folgen der Beseitigung der ursprünglichen Vegetation zu sehen und werden deshalb in traditionellen Systemen dieser Zone durch rasche, annäherungsweise Wiederherstellung derselben bis zu einem bestimmten Grade (wieder) ausgeglichen. (Kultur-Brache-Verhältnis bei etwa 1 bis 1,5 :10 Jahren.)

NYE und GREENLAND (1960) geben für den Fruchtbarkeitsverlust insbesondere folgende Gründe an:

- 1) Verschlechterung der physikalischen Bodeneigenschaften (Verlust der Streuaufgabe, fehlende Bioturbation etc.)
- 2) Verschlechterung des Nährstoffzustandes (Humus, P u.a.)
- 3) Zunahme von Krankheiten und Schädlingen (Reduktion der Diversität)
- 4) Zunahme der Unkräuter
- 5) Erosion des Oberbodens
- 6) Veränderungen von Umfang und Art der Bodenlebewesen (Termiten, Mykorrhiza etc.)

(Näheres zu Bodenfruchtbarkeit siehe Kapitel 2.3.)

Die landwirtschaftliche Nutzung der Standorte im tropischen, immerfeuchten Regenwaldgürtel ist schwierig; die Bodenbearbeitung ist aufgrund an-

1) In Afrika *Musanga cecropioides* (Umbrella tree), der sehr schnellwüchsig und lichtbedürftig ist; in Südamerika der Balsabaum (*Ochroma lagopus*) und *Cecropia* sp.; in Malaya *Musanga* und *Cedrela* (Wuchshöhen 4-7 m pro Jahr!). Anhaltende Brandrodung, Beweidung oder Kultur führt leicht und oft sehr schnell zu anthropogenen Savannen und sogar Halbwüsten.

haltender Bodenfeuchte ebenso wie die Unkrautbekämpfung schwer durchführbar. Die begrenzten Nährstoffreserven der Böden erlauben meist nur einen kurzfristigen Anbau annueller Kulturen und einen mittelfristigen Anbau semiperenner Kulturen. Langfristig stellen Systeme mit Dauerkulturen (Büsche und Bäume) die bisher einzige erfolgreiche Form der Landnutzung dar (ANDREAE, 1980). VARESCHI (1980) bemerkt zu den tropischen Regenwäldern: "Die maximalen Möglichkeiten sind die höchsten der Erde, das Risiko der minimalen daneben ist aber immer in bedrohlicher Nähe."

Nur Nutzungssysteme, die sich eng an den natürlichen ökologischen Verhältnissen orientieren, können hier langfristig erfolgreich sein (siehe auch Kap. 4.5.).

2.2.2. Der halbbimmergrüne Regenwald (saisonaler Regenwald)

Ökologisch gesehen ist die Formation des halbbimmergrünen tropischen Regenwaldes im Spannungsfeld zwischen dem immergrünen Regenwald und den laubabwerfenden Wäldern zu sehen. Die Vegetation ist dementsprechend eine diffuse Mischung der beiden Vegetationstypen.

Ein **typisches** Merkmal des halbbimmergrünen Regenwaldes, der seiner ganzen Natur nach einen Übergangscharakter hat, ist sein zweistufiger Aufbau (WALTER, 1964).

Die oberste Baumschicht - bis etwa 30 Meter Höhe - ist die laubabwerfende Schicht, während die unteren Schichten und der Unterwuchs meist grün bleiben (bis um 20 Meter).

Die obere Baumschicht ist relativ dicht geschlossen (zunehmende Dichte des Umrisses mit abnehmenden Niederschlägen von mehr als 2000 mm/Jahr und auf 1300 mm/Jahr). Trotzdem ist der Lichteinfall schon höher als im immergrünen Regenwald, so daß Hochstauden, Hochkräuter und Sträucher an Häufigkeit zunehmen.

Die **Durchwurzelung** des Bodens konzentriert sich auch hier noch stark auf die oberen Bodenschichten. Nach NYE und GREENLAND (1960) ist der Wurzelanteil im Oberboden aber schon um 10 bis 15 Prozent geringer.

Brettwurzeln werden selten.

Die **Artenvielfalt** ist gegenüber den immergrünen Regenwäldern schon um 20 (bis 40) Prozent geringer. Die Diversitätenkennzahl nach VARESCHI

(1980) beträgt nur noch etwa 960 (gegenüber 1100 - 1500 und mehr im immergrünen Regenwald).

Angaben zur Produktivität des halbbimmergrünen Regenwaldes sind trotz der sehr weiten Verbreitung aufgrund fehlender Forschung in diesen Wäldern kaum zu finden (VARESCHI, 1980).

Die folgenden Angaben stammen von einem feuchten, halb-laubabwerfenden Wald im Kongo (1250 mm Niederschlag) (zit. in NYE und GREENLAND, 1960):

Nettoprimärproduktion: ca. 20 - 30 t/Jahr (geschätzt)

Biomassevolumen des Bestandes: 326 t/ha

Tab. 2.2.2.: Nährstoffe in einem halb-laubabwerfenden Regenwald im Kongo (nach NYE und GREENLAND, 1960)

	Nährstoffmengen in kg/ha				
	N	P	K	Ca	Mg
Gespeicherte Nährstoffe ¹⁾ in Vegetation	1103	110	851	1890	290

(Sukzession nach einer Rodung siehe Feuchtsavanne.)

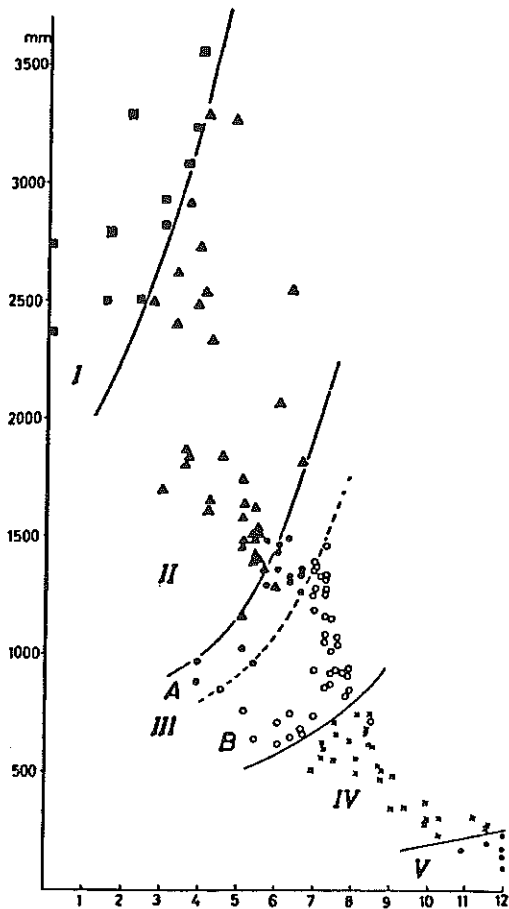
Die zunehmend spürbare jahreszeitliche Rhythmik der Niederschläge und die mengenmäßige Verringerung der absoluten Niederschläge führen einzeln und in ihrem Zusammenwirken zu einem saisonalen Verhalten vieler Arten im Wald, bzw. zu einer Zunahme von Arten mit zyklischem Vegetationsrhythmus (WALTER, 1964; VARESCHI, 1980).

Synchroner Laubfall und synchrone Blüte zunächst nur eines geringen Anteils (im saisonalen Regenwald nach VARESCHI, 1980, bis zu ungefähr 10 Prozent) der Bäume werden immer deutlicher. (Der halbbimmergrüne

1) Die Umsatzraten der organischen Masse und der Nährstoffe unterliegen schon jahreszeitlichen Schwankungen mit einer höheren Intensität in der Regenzeit und einem relativen Rückgang in der Trockenzeit. Etwas höhere pH-Werte (5-6) begünstigen den Umsatz, was insgesamt zu geringeren C-Gehalten führt, die jedoch z.T. durch die etwas bessere Qualität der Tonminerale und ein etwas engeres C/N-Verhältnis (um 12) ausgeglichen werden (entnommen den Daten von NYE und GREENLAND, 1960).

Regenwald nach WALTER (1964) schließt auch noch die feuchten Passatwälder VARESCHIs mit einem laubabwerfenden Anteil von 20 bis 30 Prozent mit ein.)

Abb. 2.2.c zeigt Auswertungen nach WALTER (1964), aus denen hervorgeht, daß für die Ausprägung der feuchten Waldtypen vor allem die Dauer der Dürrezeit ausschlaggebend ist, während bei den trockeneren Typen die absolute Niederschlagsmenge mehr zum bestimmenden Merkmal wird. (Die ökologischen Spielräume decken sich gut mit Untersuchungen von VARESCHI, 1980.)



Die Beziehungen zwischen Waldvegetation und Niederschlagshöhe (Ordinate) sowie Dauer der Dürrezeit in Monaten (Abszisse) in Indien. I immergrüner und II halbimmergrüner tropischer Regenwald, III Monsunwald (A feuchter, B trockener), IV Savanne (Dornbuschwald), V Wüste.

Abb. 2.2.c: Die Beziehungen zwischen Waldvegetation und Niederschlagshöhe (Ordinate) sowie Dauer der Dürrezeit in Monaten (Abszisse) in Indien (nach WALTER, 1964)

In ackerbaulicher Hinsicht läßt sich sagen, daß aufgrund der jahreszeitlich eintretenden Trockenheit Brandrodung leichter durchführbar ist und auch öfters praktiziert wird. Vor allem in Afrika ist die Formation deshalb nur noch selten im natürlichen Zustand anzutreffen. Sie ist dort zur anthropogen bedingten Hochgrassavanne degradiert, die unter günstigeren Verhältnissen eine Panicaceae-Savanne ist (*Panicum maximum*, *Pennisetum purpureum*) und dann sehr produktiv sein kann. Sind die Verhältnisse ungünstiger (Boden, Niederschläge) oder die Eingriffe anhaltend, so können sich in Regionen mit mehr als 6 humiden Monaten auch zunehmend *Andropogon-Gräser* etablieren, die dann das Schlußstadium eines degradierten halbimmergrünen bzw. wechselgrünen Waldes darstellen (WALTER, 1979; NYE und GREENLAND, 1960).

Die landwirtschaftliche Nutzung begünstigt zunehmend semiperenne Arten, der Anbau annueller Kulturen wird häufiger, Trockenperioden für Ernte bzw. Bestellung wirken begünstigend auf den Anbau vieler Kulturen. In anthropogen geschaffenen Savannenvegetationen wird intensiv Regenfeldbau betrieben (oft 2 Kulturen pro Jahr) (z.B. Mais, Cassava, Baumwolle, Bananen, Erdnuß, Bohnen, Yams).

Die Tierhaltung findet Eingang in die Betriebe.

Der Abfall der Bodenfruchtbarkeit erfolgt nicht mehr so rasch wie in den Gebieten des immergrünen Regenwaldes. Nach NYE und GREENLAND (1960) kann es hier unter Umständen 8 (bis 20) Jahre dauern, bis extreme Ertragsabfälle eintreten (je nach Ausgangsniveau und Böden).

2.2.3. Feuchtsavanne (Sommerregengebiete)

Ausgeprägt wechselfeuchte Verhältnisse kennzeichnen die Vegetation dieser Zone, die in ihrem Charakter nicht so einheitlich ist wie etwa der tropische Regenwald.

VARESCHI (1980) beschreibt für zwei Standorte mit etwa 1100 mm Jahresniederschlag einen trockenen Passatwald (ca. 4 Monate arid) und einen trocken-kahlen Wald mit mehr ausgeprägter Trockenzeit. (Letzter entspricht etwa dem "Trockenwald" WALTERs oder dem "sehr trockenen tropischen Wald" von HOLDRIDGE.)

Die Formation, die ökologisch zwischen saisonalen Regenwäldern und Trockensavannen angesiedelt ist, hat einen einstufigen Aufbau, einen gleichmäßig geschlossenen Umriß und ist von daher dem Wald der gemäßigten Klimate sehr ähnlich. Großflächiges Auftreten ist seltener; meist tritt die Vegetation mosaikartig auf.

Die Wuchshöhe liegt im "trockenen Passatwald" um 8 Meter und erreicht im "trocken-kahlen Wald" bis zu maximal 20 Meter Höhe. (Abb. 2.2.d zeigt einen trockenen Passatwald in Südamerika.)

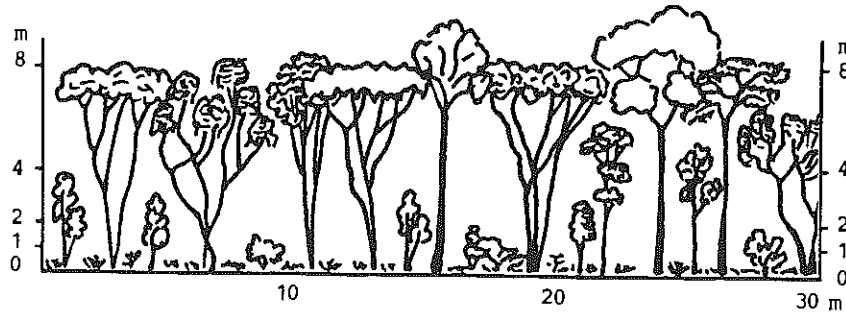


Abb. 2.2.d: Ansicht eines trockenen Passatwaldes bei Quiriquire in den Llanos von Venezuela; 74 m ü.M., 1154 mm Jahresniederschlag (gezeichnet nach VARESCHI, 1980)

Der Unterbau ist im natürlichen Zustand schwach ausgebildet; es existiert aber eine echte krautige Feldschicht, die durch die jahreszeitliche Entlaubung der Bäume begünstigt wird. Der Anteil der immergrünen Bäume liegt nach VARESCHI (1980) definitionsgemäß bei bis zu 10 Prozent.

Gräser treten erst zum Rand gegen die Savanne hin vermehrt auf.

Das Wurzelwerk greift tief in den Unterboden. Die Gehölze haben meist kleine Blätter (z.T. schon gezähnt) und eine kräftige Borke an den Stämmen. Leguminosen stellen einen hohen Anteil der Arten (20 bis 30 Prozent und mehr) (WALTER, 1964; VARESCHI, 1980).

Die Diversität nimmt zunächst mit zunehmender Wasserknappheit deutlich ab (trockener Passatwald: Artenzahl 62); die Diversitätskennzahl 682 entspricht etwa der von Wäldern gemäßigter Klimate.

Einzelne Arten werden erstmalig dominant (VARESCHI, 1980).

Abweichend von der Regel steigt sie mit zunehmender Trockenheit und Nähe zur Grassavanne im trocken-kahlen Wald noch einmal an (Artenzahl 128, Diversitätskennzahlen bis um 1500 1).

Die Produktivität dieser natürlichen Formation ist noch relativ wenig erforscht.

Nettoprimärproduktion:

10-24 (30) t TM pro ha und Jahr (WALTER, 1979; BASILEVIC zit. in YOUNG, 1976).

Biomassevolumen eines Bestandes:

60 bis 100 t TM/ha (nach Daten von NYE und GREENLAND, 1960).

Die (anthropogene) Gras-Savannenvegetation erreicht noch nicht einmal 30 Prozent der Biomasseproduktion eines Waldes auf demselben Standort (LAMOTTE zit. in VARESCHI, 1980), d.h. es muß angenommen werden, daß auch in Feuchtsavannen ein hohes Potential mobilisierbar ist (Baumschicht und Feldschicht), das in den existierenden - durch menschlichen Einfluß degradierten - Savannen nicht realisiert werden kann.

Wie bereits erwähnt, ist die Vegetationsausprägung im Bereich der Feuchtsavannenklimate weniger einheitlich als etwa im Bereich der immerfeuchten Klimate. So können auch unter natürlichen Verhältnissen schon Busch- und Grassavannen auftreten, die ansonsten ökologisch betrachtet dem Klimabereich der Trockensavannen (klimatische Savannen) angehören (WALTER, 1979). Unter natürlichen Bedingungen sind hierfür meist spezielle Bodenverhältnisse verantwortlich (evtl. auch kleinräumliche Klimaabweichungen), die ein Wachstum von Bäumen - auch bei mehr als 1 500 mm Jahresniederschlag - verhindern können. WALTER (1964) führt

1) VARESCHI (1980) gibt als Erklärung dafür die Durchdringung der ökologischen Räume und der Wald-Gras-Grenze an.

Tab. 2.2.3.: Nährstoffspeicherung und -mobilisierung durch die natürliche Vegetation von Feuchtsavannewäldern (grobe Angaben in Anlehnung an Daten von NYE und GREENLAND, 1960)

	Nährstoffmengen in kg/ha				
	N	P	K	Ca	Mg
Gespeicherte Nährstoffe in wechselfeuchten Wäldern (2 Wälder mit 900 bzw. 1250 mm Jahresniederschlag)	275- 300	28- 50	200- 270	310- 430	ca. 100
jährliche Mobilisierung von Nährstoffen (Zuwachs einer Buschbrache; 1.-4. Jahr, bei 900 mm/Jahr)	45	3,3	34	44	10

in diesem Zusammenhang z.B. sehr undurchlässige Böden mit Verdichtungshorizonten an, auf denen es zu einem periodischen Wechsel von extremer Staunässe und Trockenheit kommt. In solchen Gebieten ist das Wachstum von Bäumen auf gut drainierende Stellen wie z.B. ehemalige Termitenbauten oder leichte Anhebungen im Gelände beschränkt.

Obwohl es sich hierbei um Ausnahmeerscheinungen handelt, können solche, für das Klima untypische, bodenbedingten Vegetationsausprägungen sehr große Flächen einnehmen, wofür die Llanos im nördlichen Südamerika ein eindrucksvolles Beispiel liefern.

Die häufigste Art einer für die klimatischen Verhältnisse untypischen Vegetationsform stellen in dieser Klimazone jedoch die auf menschlichen Einfluß zurückzuführenden Grasländer (**anthropogenen Savannen**) dar (WALTER, 1979).

Begünstigt durch das Klima (periodische Trockenheit und sichere Niederschläge für den Regenfeldbau) stellen die Feuchtsavannengebiete seit alters her Räume mit hoher Besiedlungsdichte dar. Mehr oder minder sesshafte Bevölkerungsgruppen betreiben hier seit langem Brandrodung, Ackerbau und/oder Viehzucht und haben so das Aussehen der natürlichen Vegetation in vielen Gebieten entscheidend verändert. Anstelle eines ehemals produktiven Waldes findet man deshalb oft nur noch relativ unproduktive Busch- und Grasländer vor.

LAUER (1956) beschreibt eine solche Entwicklung und die Schritte, die zur Bildung anthropogener Savannen führen, am Beispiel El Salvadors wie

folgt (verkürzte Darstellung):

- 1) Die Entnahme von nutzbaren Harthölzern führt zur Verarmung und Auflichtung der Vegetation.
- 2) Brandrodung zerstört die Vegetation bis auf wenige Stockausschläge: Wird die Brandrodewirtschaft nach 1 bis 3 Jahren aufgegeben (nach NYE und GREENLAND, 1960, folgt die Brache in dieser Zone meist nicht wegen rasch sinkender Bodenfruchtbarkeit, sondern primär wegen starker Verunkrautung und Vergrasung), so ist die Verbuschung und anschließende Regeneration des Waldes möglich. (Brachezeiten müssen länger sein als in Regenwaldgebieten, da die Biomasseproduktion hier geringer ist (siehe Tab. 2.3.8.; Kapitel 2.3.3.).
- 3) Wird in der folgenden Zeit Vieh eingetrieben, so wird Jungwuchs verhindert. Verbiß und Tritt führen zur Dominanz von Dornbüschen und Graswuchs; es entsteht eine dornbuschähnliche Savanne (*Gliricidia sepium*, *Mimosa tenuiflora*, *Paspalum* sp., *Melinis* sp., *Cimnopogon*).
- 4) Weitere Übernutzung durch Vieh und Brandrodewirtschaft führt zur Vernichtung der Bodenfruchtbarkeit, zu Bodenerosion, Devastierung und zum Verlust der Standortfruchtbarkeit (*Acacia*, *Mimosa* bzw. *Curatella*, *Psidium* und relativ wertlose Gräser stellen sich ein).

NYE und GREENLAND (1960) beschreiben ähnliche Verhältnisse für Afrika und heben besonders die Gefahren durch Vergrasung für diesen Standort hervor. (*Imperata cylindrica*, *Digitaria scalarum* und andere Ungräser können leicht zu einem limitierenden Faktor für den Regenfeldbau werden.)

Für die landwirtschaftliche Nutzung sind die Verhältnisse in dieser Region günstig. Sie erlauben den Anbau einer Vielzahl annueller und auch perenner Kulturpflanzen. Die natürliche Fruchtbarkeit der Böden ist höher als in den immerfeuchten Gebieten, und die Niederschläge erlauben ein bis zwei sichere Ernten. Alle ackerbaulichen Maßnahmen müssen darauf ausgerichtet sein, die Produktivität der Böden zu erhalten, die vor allem durch Humusschwund, Erosion und Bodenverdichtungen gefährdet ist.

Wird die organische Substanz geschont, regelmäßig Humus zugeführt, auf Brandrodung und übermäßige mechanische Bodenbearbeitung verzichtet, so sind gute Voraussetzungen für eine mittel- bis langfristig gute Ertragsfähigkeit gegeben (NYE und GREENLAND, 1960, führen zahlreiche Beispiele dazu an).

Die Verhältnisse für eine Integration der Tierhaltung in die landwirtschaftlichen Betriebe sind günstig. Sie kann, sofern die soziokulturellen Rahmen-

bedingungen dies erlauben, einen wichtigen Beitrag zur Humuswirtschaft und zur inneren Geschlossenheit der Betriebe leisten. Auch für eine Einbeziehung von Bäumen und Sträuchern in die Anbausysteme sind günstige ökologische Bedingungen gegeben; sie können erheblich zur Produktivität und Stabilität der Agroökosysteme beitragen.

Mischkulturanbau und Bewässerung stellen weitere klimatisch begünstigte Möglichkeiten der landwirtschaftlichen Intensivierung in Feuchtsavannen-gebieten dar.

2.2.4. Trockensavanne (klimatische Savanne)

Zum Begriff der Tropischen Grasländer ist zunächst zu sagen, daß der Ausdruck "Steppe" nur noch für Grasländer außerhalb der Tropen verwendet werden sollte (z.B. Grasländer der Ukraine oder Nordamerikas). Grasländer im Bereich der Tropen werden als **Savannen** bezeichnet (gleichgültig, ob sie reine Grasflächen darstellen oder mit einzeln wachsenden Bäumen bestanden sind (VARESCHI, 1980)).

Nach WALTER (1979) bilden sich tropische Grasländer (klimatische Savannen) am ehesten in Sommerregengebieten mit 200 bis 500 mm Jahresniederschlag aus.

In Gebieten mit relativ hohen Niederschlägen (größer 400-500 mm) finden sich in der Regel noch viele Bäume, die oftmals als lockere Bestände in gleichmäßig weiten Abständen das Grasland durchsetzen (Obstgarten-savannen).¹⁾ Die Bäume sind meist niederrwüchsig (3-5 m Höhe), und nur selten werden Wuchshöhen von 10 bis maximal 15 m erreicht.

Die Bäume nutzen im wesentlichen das Niederschlagswasser, das von der flach wurzelnden Grasschicht nicht verbraucht wurde und in den Unterboden sickern konnte, wo es nur noch von Bäumen und Sträuchern mit ihrem weitverzweigten, tiefgreifenden Wurzelwerk genutzt werden kann.

Das Wurzelwerk der Bäume greift dabei meist weit über die relativ schwach entwickelte Krone hinaus. *Curatella* zum Beispiel erschließt mit über 6 m tiefen Wurzeln ein Bodenvolumen von etwa 3000 m³ (1), wäh-

1) Wälder mit Grasunterwuchs werden von WALTER (1979) als Savannenwälder bzw. Savannengehölze ("woodlands") bezeichnet.

rend ein Horstgras nur den Bruchteil eines Kubikmeters im Oberboden (mehr als 70 % der Wurzeln in 15-20 cm Tiefe) erschließt (VARESCHI, 1980; NYE und GREENLAND, 1960).

Mit zunehmender Trockenheit und Verschärfung der Konkurrenz um das Wasser, welches mit abnehmenden Niederschlägen immer weniger tief in den Boden eindringen kann, bleibt für die Bäume (den Unterboden) immer weniger Wasser übrig, so daß sie an Zahl und Größe abnehmen und in zunehmendem Maße zunächst Büschen und Sträuchern und schließlich mehr oder minder reinen Grasländern Platz machen.

Auf feinsandigen Böden in Südwestafrika ermittelte WALTER (1979), daß diese Grenze zum reinen Grasland bei etwa 200 bis 300 mm Niederschlag erreicht war. Bis zu dieser Grenze verbrauchten die kleinen Horstgräser alle oberflächlich in den Boden eingesickerten Niederschläge.

Die Gräser transpirieren stark und können in kurzer Zeit viel Biomasse produzieren. Allerdings verläuft die Transpiration bei den Gräsern auch dann mehr oder minder ungebremst weiter, wenn Wassermangel eintritt. Das hat zur Folge, daß die oberirdischen Teile nach dem Aufbrauchen der Wasservorräte relativ schnell vertrocknen und absterben. Nur einige Wurzeln und die geschützt im Innern der Pflanze liegenden Vegetationspunkte überdauern, um nach neuen Regenfällen wieder auszutreiben.

Gehölze können sich durch das Schließen der Stomata und durch den Abwurf von Blättern im allgemeinen zwar gut gegen Wasserstress schützen, sie können sich aber bei absolutem Wassermangel über längere Zeiten nicht mehr halten, denn sie brauchen auch in der Trockenzeit eine gewisse (wenn auch nur geringe) Wassermenge, um überleben zu können (nach WALTER, 1964 bei Sträuchern etwa 5-7 % des Frischgewichtes pro Tag).

Einhergehend mit dieser Entwicklung vollzieht sich mit abnehmenden Niederschlägen der Übergang von Hochgrassavannen zu Horstgrassavannen und schließlich Kurzgrassavannen.

Die relativ fruchtbaren Hochgrassavannen (1,5-5 m Wuchshöhe) können z.B. mit Panicum- und Pennisetum-Gräsern bestanden sein, während die weniger fruchtbaren, auch degradierten oder trockeneren Grasländer mit Andropogon-Gräsern (*Hyparrhenia* sp., *Andropogon* sp.) bestanden sind. Letztgenannte Gräser sind typische Vertreter der Horstgrassavannen, können sich jedoch in durch den Menschen geschaffenen Savannen auch noch in Gebieten mit über 6 humiden Monaten ausbreiten (z.B. bei regelmäßiger Brandrodung).

Die Kurzgrassavannen erreichen nur noch Wuchshöhen von 30 bis 40 cm.

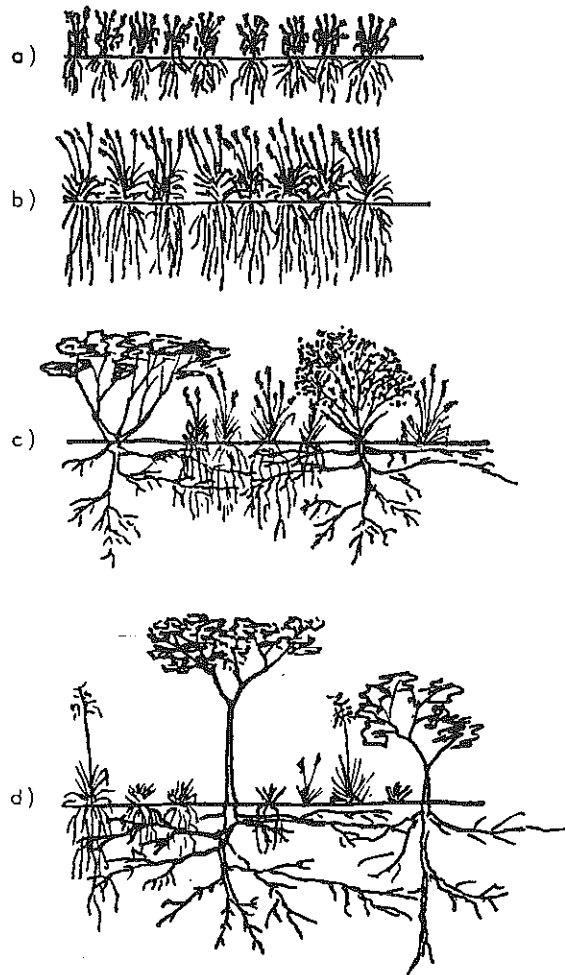


Abb. 2.2.e: Schematische Darstellung des Übergangs vom Grasland (a und b) zur Savanne (c) und zum Trockenwald mit zunehmenden Niederschlägen (leicht verändert nach WALTER, 1979)

Nicht immer folgt die Entwicklung jedoch dem oben beschriebenen Schema, das typisch ist für feinsandig-lehmige Böden mit relativ hoher Wasser(-festhalte)kapazität. In diesen werden die Niederschläge in der oberen Bodenschicht adsorbiert und fördern somit die Ausbildung einer Grassavanne, die von der Ausnutzung zeitlich vorhandener, oberflächennaher Wasservorräte begünstigt wird.

Auf solchen Böden sind die Gräser Antagonisten der Bäume und können erst von ihnen verdrängt werden, wenn soviel Niederschläge in tiefere Bodenschichten gelangen, daß ein geschlossener (die Gräser beschattender) Waldbestand möglich wird.

Anders verläuft die Entwicklung auf steinigem Böden. Hier sind die Holzpflanzen den Gräsern absolut überlegen, denn die Niederschläge dringen hier sehr schnell in den Unterboden ein, während im Oberboden kaum Erde - und damit auch wenig Wasser - für eine kräftige Grasschicht verbleibt.

Die Bäume mit ihrem weitgreifenden Wurzelsystem nutzen dagegen die ungleich im Profil verteilten Niederschlagsreserven relativ optimal und bleiben deshalb auf steinigem Standorten stets dominierend. Mit abnehmenden Niederschlägen werden die Gehölze lediglich kleiner und rücken in ihrer Standweite mehr auseinander (WALTER, 1979).

Sonderfälle in der Vegetationsausbildung der Trockensavannen ergeben sich, wenn spezielle Bodenverhältnisse vorliegen oder die zwei geschilderten Fälle (lehmig-sandige bzw. steinige Böden) sich überlagern, wie das z.B. bei wechselnden Böden oder bei flachgründigen Böden über Festgestein der Fall sein kann.

Die Artenvielfalt im Bereich des Trockensavannenklimas ist, wie die Vegetation selbst, sehr unterschiedlich. VARESCHI (1980) ermittelte auf 6 verschiedenen Standorten, die von einer Halophytensavanne über extrem nährstoffarme Böden bis zu relativ typischen Savannenstandorten reichten, Artenzahlen von 6, 22 und 144. Hiernach scheint es so zu sein, daß neben Wasserknappheit auch die Verschlechterung anderer Wachstumsfaktoren (Salinität, Nährstoffarmut etc.) die Artenzahl reduziert. Das gilt auch für Standorte, die regelmäßig von Bränden heimgesucht werden (LAMOTTE, 1975).

Die Diversitätenkennzahl nach VARESCHI (1980) schwankt in etwa zwischen 300 und 800 (Mittelwert um 550), wobei das Artenspektrum welt-

weit eine hohe Übereinstimmung aufweist. Die Vielfalt von Waldgesellschaften wird in Savannen nicht erreicht (LAMOTTE zit. in VARESCI, 1980).

Einzelne Arten treten in hoher Dichte auf, das heißt, das Prinzip hoher Arten- und geringer Individuendichte, das vor allem im immerfeuchten tropischen Regenwald zu erkennen ist, ist hier umgekehrt (hohe Individuendichte, geringe Artendichte).

Die Produktivität klimatischer Savannenstandorte wird von RODIN und BASILEVIČ (zit. in YOUNG, 1976) mit etwa 7 t Trockenmasse pro ha und Jahr angegeben.

In Abhängigkeit von den Niederschlägen (200 bis 500 mm), den Nährstoffverhältnissen¹⁾ und der Vegetation schwanken die Werte. WHYTE (1976) gibt für semiaride Standorte bis max. 500 mm Jahresniederschlag eine oberirdische Biomasseproduktion von 1 bis 6 t Trockenmasse pro ha an (Gesamtnettprimärproduktion mit unterirdischen Vegetationsorganen (Rhizome, Knollen etc.) 2,5 - 10 t/ha).

LAMOTTE (1975) ermittelte in ungebrannten Buschsavannen maximale Werte von 13 t Trockenmasse/ha und Jahr; sie lagen wesentlich höher als die Produktivitätswerte anthropogener Savannen, die z.B. in der Elfenbeinküste, trotz der hohen Niederschläge von 1300 mm/Jahr, nur eine jährliche Biomasseproduktion von 5,5 bis 7 t Trockenmasse erreichten.

Der Blattflächenindex (BFI) einer bodenbedingten (edaphischen) Grassavanne in Venezuela lag bei 4 bis 5 (SAN JOSE und MEDINA, 1975).

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung von LAMOTTE (1975), daß sich die Leguminosen (*Tephrosia elegans*) erst üppig und stark entwickelten, als die Gräser ihre (vegetative) Hauptwachstumsphase abgeschlossen hatten, was unter Umständen durch das höhere Nährstoffaneignungsvermögen der Gräser gegenüber Leguminosen (MENGEL, 1972) erklärt werden kann.

Die Zoomasse ist in Savannenökosystemen stärker vertreten als in den

1) WALTER (1964) gibt für Grassavannen einen Transpirationskoeffizienten von etwa 1000 an, d.h. es werden 1000 l Wasser benötigt, um 1 kg Trockenmasse zu produzieren. Aus Untersuchungen von SAN JOSE und MEDINA (1975) geht jedoch deutlich hervor, daß diese Werte auf nährstoffverarmten, degradierten Standorten auch wesentlich höher (ungünstiger) liegen können. Auf einem regelmäßig brandgerodeten, nährstoffarmen Savannenstandort in Venezuela z.B. betrug der Transpirationskoeffizient (TK) 3000, d.h. je günstiger die Nährstoffversorgung der Pflanzen ist, desto effektiver nutzen sie das Wasser.

Waldökosystemen (Antilopen, Schafe, Kameliden, Nager etc.). Genaue Angaben über den Bestand an pflanzenfressender Zoomasse sind aber nur schwer zu machen, denn der Besatz ist stark vom menschlichen Einfluß abhängig.

Für die Bodenlebewesen ermittelte LAMOTTE (1975) etwa 6,8 kg Trockenmasse Termiten pro ha (4,5 - 5,5 Mio/ha). Sie haben eine wichtige Funktion als Zersetzer und für die Bodenstruktur.

Auf dem gleichen Standort repräsentierten die Regenwürmer eine Biomasse von 40 kg/ha und setzten nach LAMOTTE etwa 500 t Boden pro ha und Jahr um. (Das entspricht bei einer angenommenen Bodendichte von 1,3 einer Bodenaufgabe von etwa 4 cm!).

Durch **das Brennen von Savannen** wird das Bodenleben sehr stark in Mitleidenschaft gezogen. Außer für Termiten und Regenwürmer trifft das nach LAMOTTE (1975) vor allem auch für die Mikroarthropoden zu. Mit jährlicher Brandrodung lag ihr Besatz bei nur 30 kg pro ha, ohne Brandrodung dagegen bei 180 kg Trockenmasse pro ha. Auch die Actinomyzeten (wichtige Zersetzer) werden durch die regelmäßige Brandrodung um 2/3 reduziert.

Die Wirkung der Brände (kontinuierliche Verschlechterung der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften) ist demnach nicht nur auf die direkten Einflüsse des Humus- bzw. C-Verlustes zurückzuführen, sondern muß auch als Folge der Beeinträchtigung und Verminderung des Bodenlebens angesehen werden.

Das regelmäßige Brennen stellt mit der Überweidung zusammen die stärkste und häufigste **menschliche Beeinflussung der Savannenökosysteme** dar: Den kurzfristigen Vorteilen des Brennens (eine saubere Fläche, ein früherer Grasaustrieb, unter Umständen eine Einengung des C/N-Verhältnisses) stehen langfristig schwerwiegende Nachteile entgegen.

Der bereits erwähnte Verlust an organischer Masse und die Reduktion des Bodenlebens führen zu Bodenverhärtungen, vermindertem Infiltrationsvermögen des Bodens, verminderter Wasserkapazität und als Folge davon auch oft zu großen Erosionsschäden (um nur einige der Negativeffekte zu nennen). Begleitet von einer Reduktion der Artenzahl, führt das Brennen in der Regel zu einem Rückgang der Boden- und Standortfruchtbarkeit.

Starkes Beweiden oder Überweiden führt in den Savannen meist zur Selektion von Pflanzen mit relativ geringem Futterwert. Außerdem führt Überweidung dazu, daß das ursprünglich den Boden dicht überziehende Grasland

Fehlstellen bekommt, weil sich die Pflanzen wegen des dauernden Tritts und Verbisses durch die Tiere nicht mehr regenerieren können (zusätzliches Brennen fördert diese Entwicklung). Auf solchem Weideland können sich vermehrt (Dorn-)Büsche und Sträucher einstellen. Dornbüsche werden aber von den Weidetieren weitgehend gemieden und verdrängen in der Folgezeit mehr und mehr die Gräser, so daß in relativ kurzer Zeit ein undurchdringliches Dornbuschdickicht entstehen kann (LAUER, 1956; WALTER, 1964; VARESCHI, 1980).

Überweidung und regelmäßiges Brennen führen also langfristig zu landwirtschaftlich relativ wertlosem Land, weshalb es ratsam ist, beides zu vermeiden.

Durch einen Verzicht auf das Brennen alleine läßt sich die Situation kurz- bis mittelfristig aber nicht immer verbessern, denn die Verbuschung hält in der Regel unvermindert an, wenn nicht gleichzeitig der wieder aufkommende Graswuchs gefördert und geschont wird (WALTER, 1964). Das spätere Austreiben der Gräser kann nach VARESCHI (1980) durch Umtriebsweiden und die Anlage von Notfutterflächen ausgeglichen werden, wodurch - ohne Brennen - langfristig produktivere und ökologisch stabilere Weiden entstehen.

Die landwirtschaftliche Nutzung ist im Bereich der Trockensavannen vor allem durch die Wasserknappheit eingeschränkt. Nahe der Grenze für den Regenfeldbau ("agronomische Trockengrenze") können nur noch trockenresistente, annuelle Kulturpflanzen ohne besondere Maßnahmen (Methoden des dryfarming) angebaut werden (z.B. Sorghum, Millet, Sesam, Erdnuß, Erderbse). Der Ackerbau steht in sehr starker Konkurrenz zur Viehhaltung, die in dieser Klima- bzw. Vegetationszone oft dominant ist. Humus-schonende Bodennutzung und Maßnahmen zum Erosionsschutz sind vordringlich zu beachten. Die Produktionsrisiken, vor allem durch unzuverlässige Niederschläge, müssen von Anfang an berücksichtigt werden. Durch Integration von trockenresistenten Bäumen und Sträuchern läßt sich die Produktivität der Gebiete unter Umständen erheblich verbessern (FELKER, 1981; ZECH, 1981; MAYDELL, 1983).

2.2.5. Halbwüsten und Wüsten

An die klimatischen Savannen schließen sich jenseits der agronomischen Trockengrenze die Halb- und Vollwüste an.

Die Vegetation ist sehr artenarm. Nur wenige Spezialisten, die relativ unabhängig von den jährlichen Niederschlagsschwankungen sind, kommen, vor allem in Senken, vor (z.B. Acacia, Prosopis, Albizzia, Kakteenarten). Ephemerer (d.h. Pflanzen mit sehr kurzer, saisonaler Wachstumsdauer) stellen den komplementären Teil der Vegetation dar, der sich, in Abhängigkeit von unregelmäßig auftretenden Niederschlägen, kurzfristig und spontan entfalten kann.

Nach RODIN und BASILEVIČ (zit. in YOUNG, 1976) kann die stehende Biomasse einer halbariden Vegetation etwa 6 t Trockenmasse pro ha erreichen; der Zuwachs beträgt etwa 10 bis 20 Prozent (d.h. 0,6 - 1,2 t/ha) der stehenden Biomasse pro Jahr (WHYTE, 1976), ist jedoch stark von den Standortbedingungen (z.B. Fels, Salinität etc.) abhängig.

Landwirtschaft beschränkt sich in diesen Gebieten auf eine sehr extensive Weidewirtschaft (Nomadentum). Nur mit besonderen Techniken des "dryfarming" und des "water-harvesting" läßt sich in den Halbwüsten noch Ackerbau betreiben, weshalb WHYTE (1976) die Halbwüsten von den Vollwüsten dadurch abgrenzt, daß sie noch ein "dryfarming" zulassen. In Einzelfällen, d.h. wenn im tiefen Unterboden Grundwasser vorhanden ist, kann auch die Nutzung von Wüstenbäumen (Prosopis) sinnvoll sein (FELKER, 1980; FELKER, 1981).

Anlegen lassen sich solche Bestände in diesen Gebieten aber nur sehr schwer, denn zwischen dem Grundwasser und dem kurzfristig nassen Oberboden findet sich meist eine Schicht, die immer trocken bleibt. Nur durch einen Trick läßt sich nach WALTER (1964) dieses Hindernis evtl. überwinden, nämlich dadurch, daß man die Bäume so lange bewässert, bis sie den Anschluß an das Grundwasser geschafft haben (siehe ebenda, S. 320).

Von Natur aus können sich Bäume in solchen Gebieten nur nach ganz außerordentlichen und höchst seltenen Niederschlagsereignissen etablieren (z.B. einmal in 100 bis 200 Jahren).

2.3. Böden

2.3.1. Prozesse der Bodenbildung und -dynamik in den Tropen

2.3.1.1. Tieflandböden

Die ursächlichen Faktoren der Bodenbildung, auf die hier nur kurz und oft verallgemeinernd eingegangen werden kann, sind in den Tropen im Prinzip dieselben wie in den gemäßigten Klimaten (Ausgangsmaterial, Klima, Vegetation, Topographie, Zeit, Schwerkraft, Grundwasser, Mensch usw.) und unterscheiden sich nur durch die Intensität und Kontinuität der Wirkung einzelner Faktoren (insbesondere von Temperatur und Niederschlag) (BURINGH, 1979; YOUNG, 1976).

Innerhalb der Tropen wirken diese Faktoren, wie in den gemäßigten Breiten, sehr unterschiedlich, das heißt, auch hier treten Differenzierungen auf.

"Die tropischen Böden" gibt es nicht! - Es gibt ältere, stark verwitterte Böden (wegen fehlender Eiszeiten in den Tropen häufiger) und junge Sediment- oder Vulkanascheböden, humusreiche und humusarme Böden, tief- und flachgründige Böden usw. Je nach Intensität und Dauer der Einwirkung der bodenbildenden Prozesse sind die Böden unterschiedlich entwickelt und haben unterschiedliche Eigenschaften.

Zwei der wichtigsten Faktoren, welche die Bodenbildung beeinflussen, sind die Klimacharakteristika Temperatur und Niederschlag.

Die gegenüber gemäßigten Breiten **höheren Temperaturen** bewirken einen beschleunigten Verlauf der chemischen Verwitterung von Mineralien durch H^+ - und OH^- -Ionen des Wassers (**Hydrolyse**). Die Hydrolyse stellt den bedeutendsten Vorgang bei der chemischen Verwitterung dar und verläuft bei 25° C fast doppelt so schnell wie bei 10° C.

Auch die Van't Hoff'sche Temperaturregel, die besagt, daß die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion beim Anstieg der Temperatur um 10° C auf das 2- bis 3fache ansteigt, gibt uns einen Hinweis darauf, wie stark die Temperatur in die Bodendynamik und in Zersetzungsprozesse eingreift.¹⁾

1) Auf Grenzen und Möglichkeiten, die Temperatur des Bodens zu beeinflussen, wird im "Maßnahmenkapitel" (4.3.) eingegangen.

Warme, wässrige Lösungen haben außerdem eine höhere Löslichkeitskonstante, das heißt, je wärmer das Wasser, desto größer sind mögliche Auswaschungswirkungen und Translokationen (Lösung, Verlagerung, Ablagerung).¹⁾ Dies bezieht sich nicht nur auf die Nährstoffauswaschung und auf organische Huminstoffe, sondern bewirkt auch den für tropische Klimaverhältnisse sehr bedeutenden Prozeß der Entkieselung (Desilifizierung).²⁾ Rein silikatische Minerale (z.B. arme Quarzsande in Westafrika) sind dagegen resistenter als solche mit einem hohen Anteil an Mg, Mn, Fe usw. wie z.B. Olivin. Im gemäßigten Klima, in tropischen Höhenlagen und in Trockengebieten werden bei der Verwitterung (Hydrolyse) und Neubildung von sekundären Mineralen bei pH-Werten von 6 bis 7 und hoher Konzentration von Kieselsäure und Alkali- und Erdalkalitionen Dreischicht-Tonminerale (Illit, Montmorillonit, Vermiculit etc.) gebildet (= 2 : 1 Tonminerale).

In den feuchtwarmen Tropen dagegen kommt es bei niedrigem pH (< 4,5 bis 5,5), niedriger Konzentration von Kieselsäure (H₄SiO₄) und Auswaschung von Basen vorwiegend zur Bildung sorptionsschwacher Zweischicht-Tonminerale (= 1 : 1 Tonminerale) wie Kaolinit und Halloysit (Abbildung 2.3.a). Auf Böden aus ehemals basischen Magmatiten und in extrem kieselsäureverarmten Böden kommt es auch zur vermehrten Bildung von Gibbsit (Al(OH)₃), teilweise auch nach Zerstörung von Kaolinit.

Zunehmend feuchttropische Verhältnisse bewirken also zum einen, daß Tonminerale wie Kaolinit, Gibbsit und Halloysit gebildet werden, die eine geringe Kationenaustauschkapazität (ein geringes Nährstoffspeicherungs- und Bindungsvermögen) besitzen, zum anderen einen zunehmenden Abbau des mineralischen Bodenskeletts (des Ausgangsmaterials), wodurch die Böden nur noch sehr wenig Mineralstoffreserven besitzen, die bei ihrer Verwitterung mineralische Nährstoffe freisetzen. Nach MOLL (1982) haben ferrallitische Böden nur noch weniger als 10 % verwitterbare Mineralreserve, meist sogar weniger als 5 %.

In den Savannenböden ist meist noch mehr verwitterbares Bodenmaterial vorhanden, und es finden sich noch mehr sorptionsstarke Tonminerale vom Dreischichttyp (z.B. Illite, Vermiculite), die eine relativ große Oberfläche mit negativer Ladung aufweisen und mehr Nährstoffe anlagern und bei Bedarf wieder abgeben können. Auch der Basenhaushalt ist noch stärker vom Ausgangsmaterial geprägt. Ferrallitische Böden, wie sie in Savannen häufig

- 1) Dies gilt nicht für Gase, das heißt, bei warmem Bodenwasser treten schneller anaerobe Verhältnisse auf.
- 2) Lösung und Auswaschung von Silikaten (Silikate sind Hauptbestandteile von Gesteinen).

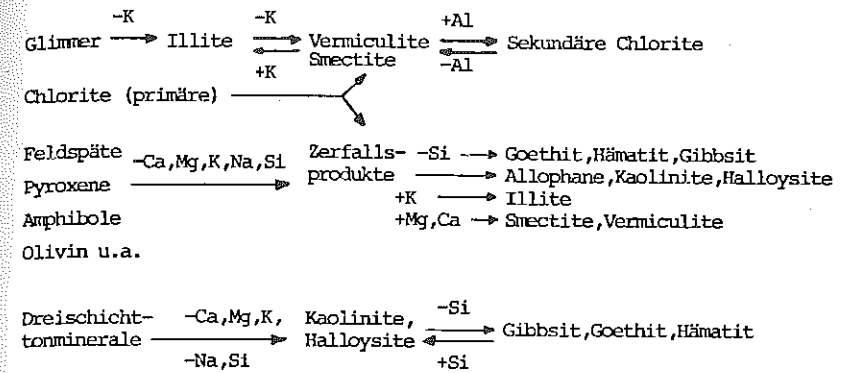


Abb. 2.3.a: Verwitterung und Umbildung von primären und sekundären Mineralen (leicht verändert nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1982)

vorkommen, besitzen nach MOLL (1982) oft noch 20 - 30 % verwitterbares Material.

Die Tonmenge insgesamt und die Art der Tonminerale haben einen bedeutenden Einfluß auf die Eigenschaften der Böden und bestimmen neben der organischen Substanz weitgehend deren Bearbeitbarkeit, Struktur und Kationenaustauschkapazität.

Tab. 2.3.1.: Austauschkapazität wichtiger Austauscher der Böden in m.ä. = milliequivalent/100 g Austauscher (nach YOUNG, 1976)

Austauscher	Kationenaustauschkapazität (KAK)
Kaolinit	3 - 15 m.e./100 g
Halloysit	5 - 50 m.e./100 g
Illite, Chlorit	10 - 40 (50) m.e./100 g
Montmorillonit	80 - 150 m.e./100 g
Vermiculit	100 - 150 (200) m.e./100 g
Organ. Substanz	100 - 350 m.e./100 g
Allophane (amorphe Al-Silikate)	10 - 50 m.e./100 g

Die **Kationenaustauschkapazität** (abgekürzt KAK oder in Englisch CEC) ist ein Maß für die Fähigkeit der Böden, pflanzenverfügbare Nährstoffe (Nährstoffkationen wie Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , NH_4^+) zu speichern und festzuhalten.

Eine niedere Kationenaustauschkapazität (< 5 - 10 m.e./100 g Boden) bedeutet, daß die Böden bzw. die Tonminerale der Böden wenig negative Oberflächenladung besitzen, um an ihren Oberflächen Nährstoffe festzuhalten.

Selbst wenn auf solchen Böden (auch sorptionsschwache Böden genannt) größere Düngermengen verabreicht werden, können diese schnell durch Auswaschung wieder verloren gehen, ganz besonders in gut drainierenden Böden bei hohen Niederschlägen.

Auch sind sorptionsschwache Böden nur gegen Nährstoffungleichgewichte gepuffert, so daß Dünger- und Kalkgaben das Verhalten der Böden und der Nährstoffe schnell und bedeutend verändern können.

Wenn auf solchen kaolinitreichen Böden mit geringer Nährstoffspeicher- und -austauschkapazität gedüngt wird, ist es zur Vermeidung von Nährstoffauswaschungen und zur Verhinderung von Nährstoffungleichgewichten wichtig, nicht viel Dünger auf einmal zu geben, sondern in mehreren kleinen Gaben, entsprechen dem zeitlichen Bedarf der Kulturpflanzen, zu düngen.¹⁾

Ein anderes Charakteristikum der Bodenentwicklung unter warmen, tropischen Bedingungen ist die Anreicherung von Eisen- und Aluminiumoxiden. Sie werden im Verlauf intensiver Verwitterung und Auswaschung gebildet und können andere Bodenteilchen überziehen ("coating") und zu festen Aggregaten zusammenbacken. Dieser Vorgang hat zur Folge, daß die an Ort und Stelle ("in situ") verwitterten Böden, trotz hoher Tonanteile von bis zu 80 - 90 %, eine krümelige, mürbe Struktur mit meist guten physikalischen Eigenschaften aufweisen.

Die Eisenoxide und -hydroxide verleihen den Böden auch ihre Farbe. Unter mehr dauerfeuchten Bedingungen bildet sich hauptsächlich der orange-gelbe Lepidokrokot ($\gamma\text{-FeOOH}$) neben Goethit ($\alpha\text{-FeOOH}$) mit braun-rostbrauner Farbe. Unter wechselfeuchten Verhältnissen wird mehr der blutrote Hämatit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) gebildet.

1) Langsam fließende, organische Düngerformen sind auf solchen Böden besser geeignet (z.B. Komposte, Mist, Mulch). Organische Substanz (Humus) verbessert auf Böden mit sorptionsschwachen Tonmineralen deutlich die Austauschkapazität (siehe unten).

In den an die inneren, feuchtheißen Tropen grenzenden Gebieten nehmen die Auswaschung und die Verwitterungsintensität unter nun zunehmend wechsellückigen Bedingungen mehr und mehr ab. Nur noch leicht lösliche Salze und Carbonate werden vollständig ausgewaschen. Die Basen¹⁾ unterliegen mittlerer, die Silikate (Silicium = Si) geringer Auswaschung. Böden mit mäßiger Silikatverwitterung (ferralsitische Böden) und mit Tonanreicherungshorizonten (B_t -Horizonten) sind hier stärker verbreitet. Ihr Gefüge ist im Bereich der Tonanreicherung meist prismatisch oder blockig (Alfisols, Luvisols). Ein höherer Anteil von 2 : 1 Tonmineralen gibt diesen Böden eine höhere Sorptionskraft und eine stärkere Plastizität als in der Regenwaldzone. Die Bearbeitbarkeit ist nur in bestimmtem Feuchtezustand optimal durchzuführen. Die Struktur des Oberbodens ist - bedingt durch eine andere Textur - nicht mehr so stabil, leichter verschlämmend oder auch sandig (SANCHEZ, 1976).

Die Zusammensetzung des Ausgangsgesteins prägt in zunehmendem Maß die Tonmineralzusammensetzung und den Nährstoffgehalt der Böden. (Auf jungen Sedimenten gilt dies für alle Klimazonen.)

Noch nicht vollkommen verwitterte Böden, die aus sauren Gesteinen wie z.B. aus Granit entstanden sind, haben dann bei gleichem Entwicklungsstand (Alter) weniger Basen und einen niedrigeren pH-Wert als solche, die aus basenreichen Gesteinen entstanden sind.

In Tabelle 2.3.2. ist ein Überblick über die wichtigsten Erstarrungsgesteine und ihre mineralische Zusammensetzung gegeben.

Auf schlecht drainierenden Böden bilden sich leicht mehr oder weniger hoch anstehende Staukörper mit anaeroben Bedingungen aus, die entweder permanent oder temporär (Savannen) vorhanden sein können. Im Übergangsbereich zu aeroben Verhältnissen bilden die durch Verwitterung oder kapillaren Aufstieg (Savannen) angereicherten Eisen- und Aluminiumoxide (kolloidal) Raseneisenstein aus, und es entstehen sogenannte Lateritschichten (Plinthitanreicherung), die bei Freilegung und Austrocknung irreversibel verhärtet können (lateinisch later = Ziegel).

1) Die Basensättigung (V = base saturation) in Prozent ist ein Maß für den aktuellen Nährstoffzustand bzw. für die Intensität der Auswaschung, während die Kationenaustauschkapazität (KAK) ein Maß für die potentielle Nährstoffkapazität darstellt.

Tab. 2.3.2.: Die wichtigsten Erstarrungsgesteine und das Vorkommen wichtiger Primärminerale (nach MÜCKENHAUSEN/BOGUSLAWSKI, 1981; SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1982)

	Saure Gesteine (reich an Si)			Basische Gesteine (reich an Co und Mg)
Plutonite (Tiefengesteine)	Granit	Syenit	Diorit	Gabbro
Vulkanite (Ergußgesteine)	alte Junge Quarzporphyr Rhyolith (Liparit)	Porphyrt Trachyt, Phonolith	Porphyrit Andesit	Melaphyr, Oligobas Basalt
Umwandlungsgestein	Granitgneis			Eklogit
Quarz	[Diagramm: Abnehmende Menge von links nach rechts]			
K-Feldspat	[Diagramm: Abnehmende Menge von links nach rechts]			
Na, Ca-Feldspäte (Plagioklase)	[Diagramm: Na-reich (links) bis Ca-reich (rechts)]			
Glimmer (K, Fe, Mg)	[Diagramm: Abnehmende Menge von links nach rechts]			
Augite, Hornblenden (Ca, Mg, Fe)	[Diagramm: Abnehmende Menge von links nach rechts]			
Olivin (Mg, Fe)	[Diagramm: Abnehmende Menge von links nach rechts]			

In den Feuchttropen besteht die Gefahr der Laterisierung bei Austrocknung der Böden nach Rodung oder nach Erosion der sie bedeckenden Bodenschicht.

Im Bereich der Savannen treten solche Laterite häufig in hügeligen Lagen im Hangverlauf auf, wo das austretende Sickerwasser (Hangwasser) unter aeroben Einfluß gerät und die Böden zeitweilig völlig austrocknen.¹⁾

1) Entgegen früher häufig übertriebener Angaben schätzt BURINGH (1979) den Anteil der tropischen Böden, die der Gefahr der Laterisierung ausgesetzt sind, auf ca. 7 Prozent, und SANCHEZ et al. (1982) geben an, daß nur 4 % der Böden des Amazonasbeckens der Gefahr der Laterisierung ausgesetzt sind.

In Senken oder Becken von Gebieten mit einer deutlich ausgeprägten Trockenzeit (Feucht- und Trockensavannen) entstehen durch zuströmendes silikat- und basenreiches Hangwasser verstärkt quellfähige, montmorillonitische Tonminerale, die zur Bildung meist dunkler Vertisole (siehe unten) führen können.

Beim Übergang von subhumiden zu mehr ariden Bedingungen nimmt die Basensättigung zu, und auch die Austauschkapazität¹⁾ steigt in der Regel an. Die Aluminiumsättigung (Belegung der Sorptionskörper mit Al-Kationen) geht stark zurück (YOUNG, 1976).

Nicht in jedem Fall wird aber das Wasser zum limitierenden Faktor des Pflanzenwachstums, sondern der bessere Kalkzustand des Bodens kann bis zu einem Überschuß an nun freien Ca-Ionen führen, so daß durch Apatitbildung ($Ca_5 X(PO_4)_3$; X = F, Cl oder OH) Phosphate festgelegt werden und andere Nährstoffe infolge Ionenkonkurrenz oder hohem pH nur noch schlecht verfügbar sind (Mg, K, Mikronährstoffe) (SANCHEZ, 1976).

Auch N-Mangel ist in Savannenböden mit geringem Humusgehalt weit verbreitet.

Das Niederschlagswasser dringt in bindigen Trockensavannenböden oft nur noch in 50 - 80 cm Tiefe vor, so daß nur noch Stoffverlagerung, aber keine Auswaschung mehr stattfindet.

Auf Standorten mit relativ hohem Grundwasserstand (Talmitte, Schwemmebene) wächst mit zunehmender Trockenheit die Gefahr der Versalzung. Gedüngte, durch Bewässerung und/oder kapillaren Aufstieg dem Ackerboden zugeführte Salze können sich hier leicht anreichern.

Bewässerungsmaßnahmen müssen deshalb unbedingt auf Standorte beschränkt bleiben, die eine gute Wasserführung haben und wo mit (periodischen) Überschüssen an Wasser die Salze wieder aus den Böden ausgewaschen werden können!

Die Textur (Korngrößenzusammensetzung) der Oberböden ist in wechselfeuchten bis trockenen Gebieten zunehmend von Schluff und Sand bestimmt. Schluff und Feinsand sind besonders erosionsgefährdet (das gilt auch für umgelagerte, nicht "in situ" verwitterte Böden).

1) Siehe auch Kapitel 2.3.2.

In der folgenden Abbildung (2.3.b.) ist eine Übersicht über die Bodenarten und deren prozentuale Zusammensetzung aus Ton, Schluff und Sand wiedergegeben. Die Bezeichnung der Bodenarten nach diesem Diagramm erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Böden (Bearbeitbarkeit, Wasserkapazität etc.). Da die Bodeneigenschaften in den Tropen zudem häufig durch Eisen- und Al-Oxide (Verkittung) oder durch unterschiedlich stark quellfähige Tonminerale beeinflusst werden, ist es ratsam, diese Angaben mit zu berücksichtigen bzw. stets mit anzugeben.

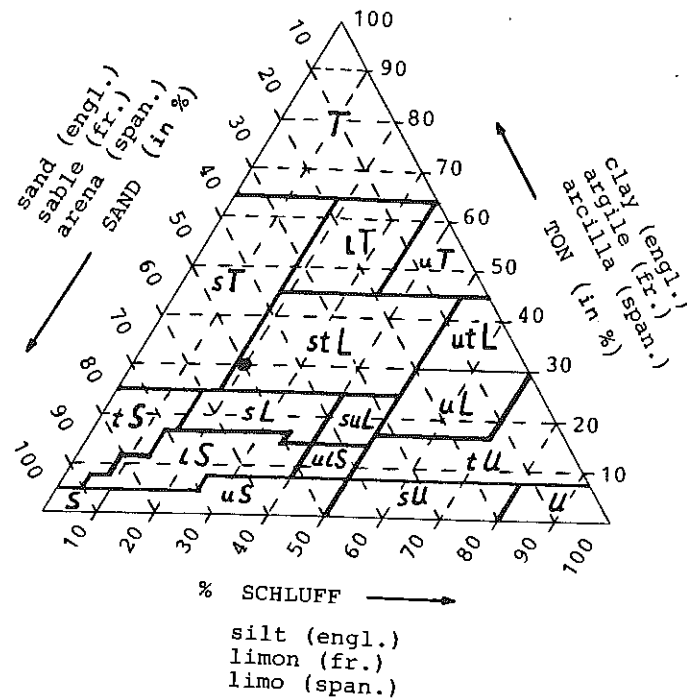


Abb. 2.3.b.: Bodenartendiagramm der Geologischen Ämter der Bundesrepublik von 1965 (gezeichnet nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982; verändert). (S = sand, s = sandig, U = Schluff, u = schluffig, L = Lehm, l = lehmig, T = Ton, t = tonig)
Beispiel: Der Punkt • entspricht einem Gehalt des Bodens an Sand = 50 %, Schluff = 20 % und Ton = 30 %; es handelt sich um einen sandig-tonigen Lehm.

Als Ton werden Bodenteilchen mit einem Äquivalentdurchmesser von $< 2 \mu\text{m}$ oder $< 0,002 \text{ mm}$ bezeichnet; Schluff $2 - 63 \mu\text{m}$ oder $0,002 - 0,63 \text{ mm}$; Sand $63 - 200 \mu\text{m}$ oder $0,063 - 2,0 \text{ mm}$.

(In den angelsächsischen Ländern verläuft die Grenze zwischen Schluff und Sand bei $50 \mu\text{m}$, und die Internationale Bodenkundliche Gesellschaft schlägt folgende Einteilung vor: Ton $< 2 \mu\text{m}$, Schluff $2 - 20 \mu\text{m}$, Feinsand 20 bis $200 \mu\text{m}$ und Grobsand $200 - 2000 \mu\text{m}$).

Die in zentraler Sicht hier kurz und vereinfacht dargestellten Prozesse können auch azonal auftreten oder wirksam werden (Regionalklimate, Ausgangsmaterial, Relief usw.). Außerdem gilt es zu beachten, daß unabhängig von den heutigen Klimaverhältnissen Böden existieren, die erst in geologisch jüngerer Zeit freigelegt wurden bzw. in früheren Zeiten entstanden sind und nun als nicht klimatypische, jugendliche Böden oder Reliktböden die aktuellen Bodeneigenschaften (mit-)bestimmen.

2.3.1.2. Gebirgsböden

Im Gebirge wirken Höhenlage (Temperatur) und Niederschläge sehr stark differenzierend (siehe oben) auf die Böden.

Außerdem wird die Bodenbildung erheblich vom Relief beeinflusst (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Bodenabtrag usw.), so daß auch hier die Verhältnisse stark wechseln können (Luv- und Leeseite, Alter der Böden).

Auf geneigten Flächen vor allem in Oberhanglagen sind die Böden oft weniger tief verwittert, da der Oberboden laufend abgetragen wird.

Mit zunehmender Höhe sinkt die Temperatur, die Mineralisation von organischer Substanz wird geringer, und es kommt zur Anreicherung von Humus (oft > 5 bis 20 Prozent) (YOUNG, 1976; BURINGH, 1979).

JAGNOW (1967) konnte sogar exponentielle Zunahmen des Humus bei abnehmender Temperatur und zunehmenden Niederschlägen ermitteln (siehe auch Kap. 2.3.3.).

Die Minerale verwittern weniger schnell. Auf vulkanischem Ausgangsmaterial kommt es zur Bildung von **Allophanen** (amorphe Aluminium-Silikate). Diese bilden mit der organischen Substanz relativ stabile Komplexe, die bei mittleren Temperaturen sowohl dem Abbau des Humusgehalts als auch der weiteren Verwitterung entgegenwirken (SANCHEZ, 1976).

P- und K-Mangel treten häufig in Gebirgsböden auf. In Höhen um 3000 Meter findet man oft flachgründige A,C-Böden (Lithosole, Regosole, Entisols); in ebenen Lagen (etwa den "Punas" in Südamerika) findet man bei guter Dränung auch Böden mit B-Horizonten (Inceptisols bzw. Cambisols; siehe Kap. 2.3.4.).

Bei mangelnder Dränung werden oft Böden mit mächtiger Humusaufgabe gebildet (SANCHEZ, 1976). Bei mittlerer bis geringer Wasserführung kommt es unter Umständen zu vermehrter Bildung von quellungsfähigen 2:1-Tonmineralen.

In mittleren Höhenlagen um 2000 Meter NN findet man häufig Böden, die denen der gemäßigten Klimate ähnlich sind.

Die häufig hohe Auswaschung in den meist gut dränenden Böden hat zur Folge, daß die Böden basenarm sind und bei pH-Werten um 4 bis 5 (6) eine geringe bis mittlere Fruchtbarkeit aufweisen.

Je nach verwitterbarem Ausgangsmaterial treten aber auch sehr fruchtbare Böden auf, die nachhaltig nutzbar sind. Dies gilt vor allem für die auf vulkanischen Aschen entstandenen Gebirgsböden (Andosols; siehe Kap. 2.3.4.), die große Gebiete der Tropen einnehmen (Hawaii, Java, Zentral- und Ostafrika, Anden). Sie haben hohe Nährstoffgehalte und eine gute Wasserspeicherkapazität. In tieferen Lagen gehen aber auch diese vermehrt in entbaste, nährstoffarme Kaolinit-Eisenoxidböden über (Abb. 2.3.c).

Bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Gebirgsböden müssen die (durch Relief, Umlagerungen, Auf- und Abtrag von Reliktböden, Wechsel des Ausgangsmaterials usw.) oft schnell und kleinräumlich wechselnden Bodenverhältnisse ebenso berücksichtigt werden wie der häufige Wechsel von Flach- und Tiefgründigkeit.

Maßnahmen des Erosionsschutzes sind wegen der Hangneigung und der oftmals aggressiven Niederschläge in den Tropen besonders zu beachten. Das gilt nicht nur für Ackerland, sondern auch für Grasland, wo durch Übernutzung (Verbiß, Trittschäden), von einzelnen Trittpfaden ausgehend, die Erosion sehr schnell voranschreiten kann (siehe hierzu auch GIL, 1979).

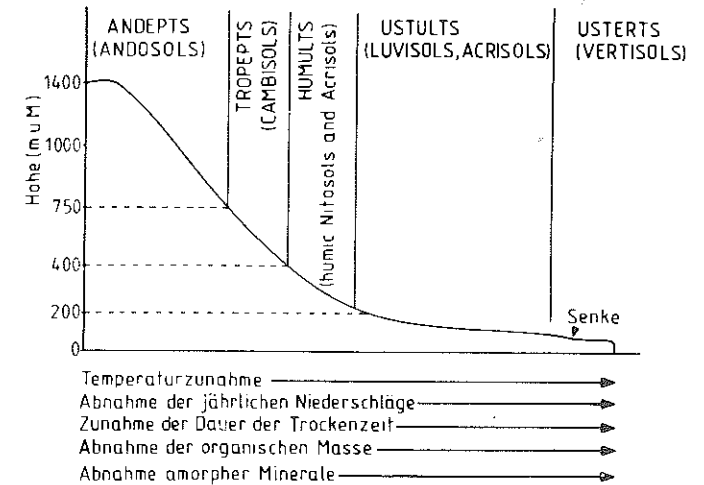


Abb. 2.3.c.: Abfolge von Böden im Hangverlauf an einem Vulkan in Indonesien (nach DUDAL und SOEPRAPTOHARDJO, 1960; leicht verändert in SANCHEZ, 1976). Angaben der Bodenbezeichnungen nach der FAO-Nomenklatur (in Klammern) hinzugefügt (siehe Kap. 2.3.4.)

2.3.2. Einige Besonderheiten fruchtbarkeitsbestimmender Merkmale tropischer Böden

Auf den alten, kaolinit- und oxidreichen Böden der feuchtheißen Tropen stellt die niedere Kationenaustauschkapazität, neben dem Mangel an verwitterbaren Mineralen, ein großes Problem für die Bodennutzung dar. Sie liegt auf Oxisolen und Ultisolen meist unter 10 m.e./100 g Boden (teilweise sogar unter 5 m.e./100 g), wodurch die Böden nur wenig Nährstoffe festhalten und speichern können. Das ist besonders dann der Fall, wenn z.B. nach einer Rodung und wenigen Jahren Ackerbau mit annualen Kulturen auch noch die organische Substanz zurückgegangen ist, die gerade auf tropisch-verwitterten Böden erheblich zur Austauschkapazität beiträgt (siehe Tab. 2.3.9.).

Ein weiteres, wichtiges Merkmal ferrallitischer, kaolinit-, humus- oder allophanreicher Böden (Andosols) ist die Tatsache, daß ihre Sorptionskraft (ihre Fähigkeit zur Ionenbindung) stark pH-abhängig ist, das heißt, sie besitzen einen hohen Anteil variabler Ladung.

Zur Beurteilung der Böden ist deshalb nicht nur die Kationenaustauschkapazität an sich von Bedeutung, sondern man sollte auch zwischen der potentiellen Austauschkapazität ($AK_{pot.}$) und der effektiven Austauschkapazität (AK_{eff}) unterscheiden. Die **potentielle Austauschkapazität** ergibt sich hauptsächlich aus der (schon behandelten) Art und Zusammensetzung der Tonminerale und der organischen Substanz (Tab. 2.3.1.). Je weniger sorptionsstarke Tonminerale (Dreischichttonminerale mit großer, negativ geladener Oberfläche) und je weniger Humus ein Boden hat, um so geringer ist auch seine $AK_{pot.}$

Das gilt prinzipiell auch für die **effektive Austauschkapazität** (AK_{eff}), denn sie kann höchstens so groß sein wie die potentielle; sie wird aber außerdem wesentlich vom pH-Wert des Bodens beeinflusst. Sie liegt um so weiter unter der $AK_{pot.}$, je tiefer der pH und je höher der Anteil variabler Ladung sind (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982). Vor allem für die im natürlichen Zustand oft schon sauren Andosole, Ultisole und Oxisole ist es charakteristisch, daß zwischen der $AK_{pot.}$ und der effektiven (realen) Austauschkapazität oft eine große Differenz besteht (siehe Tab. 2.3.3.). Sie ist in der Ackerkrume aller vorgenannten Böden vor allem der organischen Substanz zuzuschreiben, die mit steigendem pH deutlich an Sorptionskraft gewinnt (siehe Abb. 2.3.d.).

Im Beispiel der Böden Wisconsins betrug der Anstieg der Austauschkapazität zwischen pH 2,5 und 8 nahezu 300 m.e./100 g, d.h. etwa 50 mval pro pH-Einheit.

In den Andosolen ist die Differenz von $AK_{pot.}$ und AK_{eff} vor allem auf die Allophane, in den Oxisols und Ultisols, die bei höheren pH-Werten ebenfalls eine höhere Austauschkapazität besitzen, auf den kaolinitisch-oxidischen Tonmineralbestand zurückzuführen (siehe auch Abb. 2.3.f.).

Auf Böden mit pH-Werten unter 5 sind die Austausch- oder Sorptionskörper nicht nur mit Wasserstoff und Nährstoffkationen (Mg, K, Ca) besetzt, sondern sehr häufig zu mehr als 50 Prozent mit Aluminium (Al)-Ionen belegt, was leicht zu Aluminiumtoxizität und zur Phosphatfixierung durch Bildung von Al-Phosphaten führt.

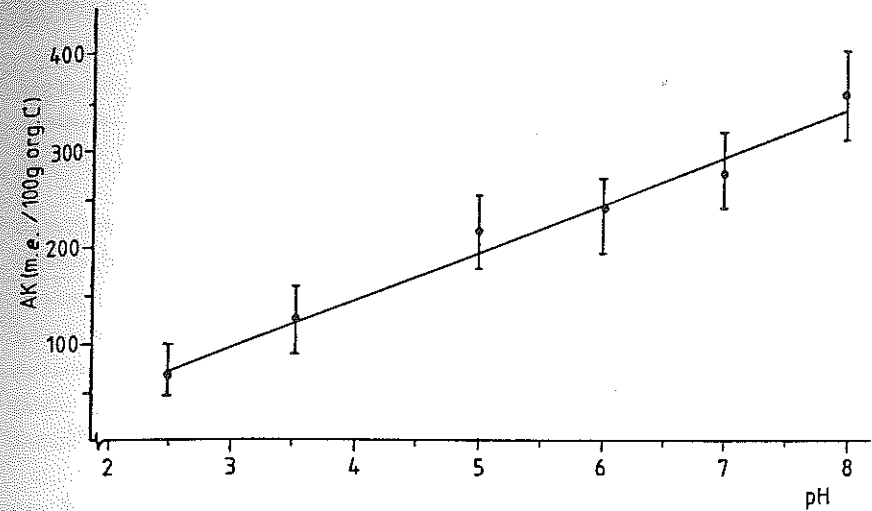


Abb. 2.3.d.: Austauschkapazität (AK) der organischen Substanz von 60 Böden Wisconsins in Abhängigkeit vom pH gepufferter, Ba-haltiger Perkolationslösung (senkrechte Linien = Standardabweichung), nach HELLING et al. (1964), zit. in SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (1982)

Nach SANCHEZ (1976) stellt die Azidität (hohe Al-Sättigung bzw. hohe Al-Konzentration, niedriger pH, Gefahr von Mangan-Toxizität usw.) ein Hauptproblem vieler tropischer Böden dar. Dies gilt vor allem für Böden in Südamerika und seltener auch für Afrika (ROOSE, 1981). Erst ab pH-Werten über 5 fällt Aluminium als Hydroxid aus, so daß Toxizität nicht mehr zu befürchten ist. (Al-Toxizität äußert sich in vermindertem, gestauchtem Wurzelwachstum; der Ca- und P-Stoffwechsel ist häufig gestört.)

Physiologisch sauer wirkende Mineraldünger (wie z.B. NH_4SO_4) fördern Al-Toxizität, da sie Al-Ionen in die Bodenlösung freisetzen (BACHE und HEATHCOTE, 1969; KREBS, 1978; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

Tab. 2.3.3.: Sorptionsverhältnisse im Oberboden bei einigen Böden tropischer und subtropischer Klimate (aus SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982)

	pH	C (%)	AK _{pot} (mval/100 g)	AK _{eff}	Sättigung (%)		Mg	K	Na
					Al	Ca			
Vertisol (Sudan)	6,8	0,9	47,0	45,2	0	71	25	0,4	3,8
Andosol (Hawaii)	4,5	11,7	53,1	13,3	3,7	71	20	3,8	2,2
Oxisol (Brasilien)	3,5	2,8	13,0	2,6	89	2,7	3,5	3,1	1,2
Ultisol (Puerto Rico)	3,5	3,3	25,6	7,2	72	15	8,3	2,8	1,4
Aridosol (Arizona, USA)	9,9	0,4	36,4	36,4	0	45	5,5	2,5	47

Durch Kalkung kann Al-Toxizität gemildert oder eliminiert werden (pH- und Kalkwirkung). Eine deutliche Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit wird jedoch nur dann erreicht, wenn auch der Unterboden von der Kalkwirkung miterfaßt wird. Geschieht dies nicht, so bleibt die Durchwurzelung des Bodens oft auf die oberen Bodenschichten beschränkt, und den Pflanzen steht dadurch nur ein begrenzt durchwurzelbares Bodenvolumen zur Verfügung. Da die Verfügbarkeit von Nährstoffen und von Wasser aber sehr wesentlich von der Durchwurzelungsintensität und dem durchwurzelbaren Bodenvolumen abhängt, müssen Böden mit einem gering durchwurzelbaren Volumen als in der Regel unfruchtbare Standorte angesehen werden (HARRACH, 1978; ROOSE, 1981). So wird z.B. das Auftreten von Wasserstress bei Kulturpflanzen durch die geringe Durchwurzelungstiefe in Al-gesättigten Unterböden stark gefördert. Selbst auf Böden mit hoher Wasserkapazität kann schon nach kurzen Trockenperioden die Wasserversorgung behindert sein, weil die Wurzeln aufgrund der Aluminiumtoxizität klein geblieben sind und nur einen Teil des im Boden gespeicherten Wassers nutzen können.

Zur Kalkung des Unterbodens sind deshalb in vielen Fällen spezielle Verfahren der Tiefkalkung erforderlich; nur auf sehr durchlässigen Böden (z.B. Oxisols bzw. Ferralsols) wird der aufgebrachte Kalk auch von selbst in relativ kurzer Zeit in tiefere Bodenschichten verlagert.

Vor übermäßiger Kalkanwendung muß jedoch gewarnt werden, denn negative Begleiterscheinungen, wie reduzierte Verfügbarkeit langsam fließender Dünger (z.B. Rohphosphat), Mikronährstoffmangel (z.B. Zink, Mangan) und stärkere Verunkrautung, können sonst leicht die Folge sein (SANCHEZ und SALINAS, 1981; KANG und OKIGBO, 1981).

Auch der Abbau organischer Masse wird beschleunigt. Denitrifikation wird begünstigt und Stickstoff wird vermehrt zu Nitrat und unterliegt dann verstärkt der Auswaschung (gegenüber Ammonium, das durch die organische Substanz und Tonminerale festgehalten werden kann (MENGEL, 1979)).

SANCHEZ und SALINAS (1981) diskutieren ausführlich das Problem der Bodenazidität auf Oxisolen und Ultisolen und empfehlen eine low-input-Strategie, die nicht die vollkommene Ausfällung des austauschbaren Aluminiums (pH 5,5) zum Ziel hat, sondern - bei Vermeidung unerwünschter Nebenwirkungen - den Nährstoffbedarf der Pflanzen sichert, Toxizität verhindert und die großen Möglichkeiten der Wahl geeigneter, Al-toleranter Nutzpflanzen und Sorten berücksichtigt.

Für die Praxis geben sie nach COCHRANE et al. (1980) folgende Empfehlung zur Ermittlung des Kalkbedarfs in t/ha:

$$\text{Kalkbedarf in Tonnen CaCO}_3 \text{ equiv./ha} = 1,8 \text{ Al - RAS (Al + Ca + Mg) /100}$$

RAS: Kritisches "relatives Al-Sättigungsniveau"* für eine bestimmte Kulturpflanze in %;

Al, Ca, Mg: Austauschbare Kationen in meq./100 g Boden (1 N KCl-Extraktion)

* Das "kritische relative Aluminiumsättigungsniveau" ist die Al-Sättigung, die von einer Pflanze noch ohne Erscheinungen von Al-Toxizität toleriert wird (leider selten bekannt bzw. verfügbar). Im Rahmen einer "low-external-input"-Strategie kann sie als die Schwelle definiert werden, bei der die Kulturpflanzen noch 80 % des maximalen Ertrages (bei voller Al-Neutralisation und optimaler P-Versorgung) erbringen (SANCHEZ und SALINAS, 1981).

Das kritische Al-Sättigungsniveau ist zwar zum Teil auch bodenbedingt, hängt aber vor allem von der Al-Toleranz der Kulturpflanzen (-sorten) ab. So wurden z.B. für 10 verschiedene Weizensorten kritische Al-Sättigungswerte von 22

bis 60 % ermittelt, wobei brasilianische Sorten, die auf Al-reichen Böden gezüchtet waren, höhere Toleranzen aufwiesen als mexikanische Sorten. Für die getesteten Upland-Reissorten betrug die kritische Al-Sättigung je nach Sorte 22 - 70 % (der entsprechende Kalkbedarf: 0,2 - 1,4 t CaCO₃ pro ha).

Manche tropischen Gräser wie *Brachiaria humidicola*, *Andropogon gayanus* und *Melinis minutiflora* tolerieren Al-Sättigungswerte von 70 - 90 %, andere von 20 - 25 % (*Panicum maximum*, *Pennisetum purpureum*). Tropische Leguminosen sind im allgemeinen noch toleranter als Gräser (kritische Al-Sättigung für *Stylosanthes* sp. z.B. 70 - 90 %, für *Centrosema* sp. 70 - 80 %), aber auch hier existieren starke Artenunterschiede (*Leucaena leucocephala* z.B. toleriert nur bis etwa 30 % Al-Sättigung).

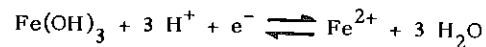
Allgemein als tolerant gegenüber Al-Toxizität gelten z.B. Maniok, Kuhbohnen, Bananen und Reis, während Phaseolusbohnen, Mais, Soja und Süßkartoffeln als empfindlich eingestuft werden, wobei allerdings einzelne Sorten mit hoher Toleranz bekannt sind.

Von den Fruchtpflanzen sind z.B. Passionsfrucht, Ananas, Guave und Mango relativ Al-tolerant. Bei Bäumen trifft das für Hevea, Kaffee, die Pfirsichpalme, die Ölpalme, Gmelina usw. zu (Näheres siehe SANCHEZ und SALINAS, 1981).

Mangantoxizität kann in verdichteten oder staunassen, sauren Böden unter pH 5,5 auftreten (gefördert durch Luftmangel) und tritt häufig mit Al-Toxizität zusammen auf (Azidität).

Hohe Gehalte an Eisenoxiden bewirken eine gute Wasserführung und eine meist gute Bodenstruktur. Zum Teil kommt es aber zu Eisentoxizität, speziell bei staunassen Bedingungen. Die Toxizität wird durch reduziertes Eisen (Fe²⁺) hervorgerufen, das bei niederen pH-Werten und niederem Redoxpotential von den Oxiden in Lösung geht.

Daß Fe²⁺-Bildung auch schon bei relativ neutralen pH-Verhältnissen möglich ist, wird aus der folgenden Gleichung (nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982) ersichtlich:



Das bedeutet: Je saurer ein Boden und je mehr Luftmangel im Boden herrscht, desto eher ist mit Eisentoxizität zu rechnen (z.B. nach Einarbeitung unzer-

setzter organischer Substanz unter staunassen Verhältnissen). Bereits humifizierte organische Substanz (z.B. Kompost) wirkt auch hier durch Bildung größerer Komplexe der Eisentoxizität entgegen.

In der Regel ist es jedoch nicht die Toxizität von Eisen, welche das Wachstum von Pflanzen limitiert, sondern die Eigenschaft der Eisenoxide, Phosphat zu fixieren. Phosphatmangel (bzw. Phosphat-Adsorption) ist besonders ausgeprägt in den tropischen Verwitterungsböden mit hohen Eisenoxidgehalten.

Die spezifische P-Sorption an Eisen- und Al-Oxide (siehe Abb. 2.3.e.) ist relativ stabil, so daß solches Phosphat für Pflanzen praktisch nicht verfügbar ist.

Düngung mit leicht löslichen Phosphaten (Superphosphat) zeigt deshalb bei normalen Aufwandmengen oft nur geringe und kurzfristige Wirkung, da das Phosphat überwiegend fixiert wird. Die Mengen, die dabei festgelegt werden, können erheblich sein. MOLL (1980) z.B. ermittelte auf eisenoxidreichen Kaolinitböden P-Fixierungsraten von 300 - 800 kg/ha alleine in den oberen 10 cm Boden.

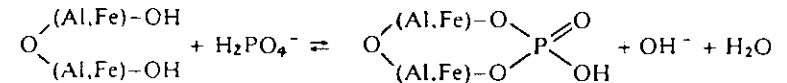
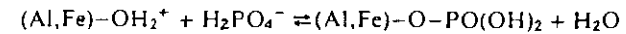


Abb. 2.3.e.: Spezifische Adsorption von Phosphat an Eisen- oder Aluminiumoxide (aus SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982)

Mit steigendem pH-Wert sinkt die Phosphatadsorption, da Hydroxydionen mit Phosphat um die Sorptionsplätze konkurrieren.

Die Phosphatverfügbarkeit in den tropischen Böden hängt aber nicht nur vom Gehalt an Eisen-Aluminiumoxiden ab, sondern wird auch stark vom Gehalt der Böden an organischer Masse und im Fall von Andosolen von deren Allophangehalt beeinflusst.

In sauren Andosolen (Vulkanascheböden) erfolgt eine P-Fixierung sowohl durch die organische Substanz als auch durch den Allophan, der unter sauren Bedingungen in erheblichem Maße Anionen (speziell Phosphat) binden kann. Die organische Substanz kann allerdings nur dann Phosphat spezifisch (fest) adsorbieren, wenn sie komplex gebundenes Fe³⁺ oder Al³⁺ enthält (was in den Tropen nicht selten ist).

Humus als solcher und Ton sorbieren Phosphat nur sehr schwach, und der Humus stellt einen sehr bedeutenden P-Speicher dar, denn 30 - 60 % des gesamten P-Vorrates eines Bodens (und mehr) liegen in organischer Form vor (IPINMIDUN, 1972; ANONYM, 1980; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

Von Mikroorganismen gebundene und in organischen Verbindungen gespeicherte Phosphate (z.B. Inosithexaphosphorsäure) stellen, neben locker an Humin- und Fulvosäuren gebundenem Phosphat, die Hauptformen organischer Phosphate dar, die eine langsam fließende Phosphatquelle sind.

Eine hohe biologische Aktivität trägt in mehrfacher Hinsicht zur Phosphatmobilisierung bei. Mykorrhizapilze z.B. sind in der Lage, Phosphat direkt aus der Streu oder aus der Umgebung langsam fließender Phosphatquellen an die Pflanze abzugeben (siehe auch Kapitel 4.6.2.), und die enzymatische Aktivität zersetzender Mikroorganismen trägt etwa über Phytasen zum P-Aufschluß bei. Auch der sehr langsam verlaufende Lösungsvorgang von relativ stabil adsorbiertem Phosphat, der vor allem auf dem Austausch von OH^- , HCO_3^- und organischen Anionen beruht, die verstärkt durch mikrobielle Aktivität und Wurzelauausscheidungen gebildet werden (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982), ist in hohem Maße von der biologischen Aktivität abhängig. Dies wurde durch jüngste Untersuchungen am CIAT in Kolumbien bestätigt, wo man herausfand, daß über diese biologische Aktivitäten auch das Phosphat aus Fe-Al-Verbindungen gelöst wird, das bisher als nicht verfügbar für die Pflanzen galt (SANCHEZ und SALINAS, 1981).

Ähnlich wie Phosphat kann auch Molybdat (geringer Sulfat und Borat) gebunden, d.h. spezifisch sorbiert werden.

Die unspezifische Adsorption von Anionen (sie erfolgt ausschließlich an variablen Ladungen) ist pH-abhängig und findet in den Fe-Al-oxidreichen, kaolinitischen Böden schon im mäßig sauren pH-Bereich statt (bei pH 6). Die oxidreichen Böden wirken dann fast als reine Anionenaustauscher (Abb. 2.3.f., links) und sorbieren bei pH-Werten unterhalb des Ladungsnullpunktes (LNP) z.B. NO_3^- und Cl^- , aber kaum Kationen. Bei Anwesenheit von viel organischer Substanz (Ladungsnullpunkt im stark sauren Bereich) und bei steigendem pH-Wert geht die Anionenadsorption zurück, die Kationenadsorption wird deutlich besser (Abb. 2.3.f., rechts).

Zinkmangel findet man häufig auf calzimorphen Böden, aber auch in den sauren Oxisolen etwa des "Cerrado" in Brasilien, d.h. nicht nur schlechte Verfügbarkeit, sondern auch absoluter Mangel an Zink ist verbreitet.

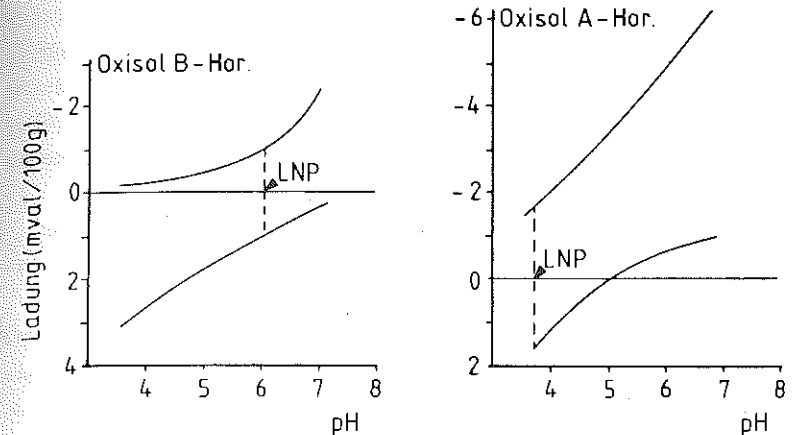


Abb. 2.3.f.: Variable Ladungsverhältnisse eines Oxisols; links ohne organische Substanz (0,7 % C), rechts mit organischer Substanz (2,5 % C). Tonfraktion des Bodens (Ferralsol aus Basalt, Brasilien): 90 % Gibbsit, Goethit, Hämatit, 10 % Kaolinit

2.3.3. Die organische Substanz (Humus) in tropischen Böden

2.3.3.1. Die besondere Bedeutung der organischen Substanz

Kaum ein namhafter Bodenkundler, der sich mit tropischen Böden befaßt, bestreitet, daß der organischen Substanz in den Tropen eine Schlüsselrolle zukommt. Dies gilt auch im Hinblick auf Produktionssysteme mit hohen externen Inputs.

YOUNG (1976) schreibt: "Die Bedeutung der organischen Masse in tropischen Böden ist größer als die irgend einer anderen Eigenschaft des Bodens, wenn man einmal von der Feuchte absieht." Und SANCHEZ (1976) betont, daß die Erhaltung der organischen Masse "von grundlegender Bedeutung für die Produktivität tropischer Böden" ist.

In bezug auf die Düngung kommt JAGNOW (1967) zu folgendem Schluß: "Soll die Bodenfruchtbarkeit in den Tropen erhalten werden, muß die Düngung in erster Linie eine organische sein."

Die Forderungen an die Praxis, die daraus abzuleiten sind, fassen IGNATIEFF und LEMOS (1963) wie folgt zusammen: "Ein korrektes Management tropischer Böden muß darauf abzielen, in Böden, die erst seit kurzem in Kultur genommen sind, sowohl die Struktur als auch die Gehalte an organischer Substanz aufrechtzuerhalten; in schon lange kultivierten Böden muß die Pflege darauf abzielen, die organische Masse anzuheben und die Struktur zu verbessern."

Die Liste solcher und ähnlich lautender Äußerungen zur Bedeutung der organischen Substanz auf typischen tropischen Verwitterungsböden ließe sich beliebig verlängern (JONES, 1971; AGBOOLA und CORREY, 1973; MOLL, 1980; ROOSE, 1981, um nur einige zu nennen).

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel erläutert, stellen "die Tropen" einen sehr heterogen gearteten Sammelbegriff dar, das heißt: auch die primäre Funktion der organischen Substanz kann auf verschiedenen tropischen Standorten durchaus verschieden sein (siehe unten). Sie ist aber in jedem Fall eine sehr bedeutende.

Im folgenden sind einige der wichtigsten Funktionen der organischen Substanz zusammengestellt:

a) Funktion als **Austauscher bzw. Sorptionskörper**: Insbesondere in kaolinitischen Böden mit von Natur aus sehr niedriger Kationenaustauschkapazität (siehe Tab. 2.3.1.) ist die organische Substanz erheblich an der Speicherung und Abgabe von Nährstoffionen beteiligt. Auf sauren, verwitterten Böden stellt sie fast die ganze Kationenaustauschkapazität (YOUNG, 1976). AGBOOLA (1975) konnte diese Bedeutung der organischen Substanz für die Austauschkapazität und den Nährstoffhaushalt der Böden Westnigerias anschaulich verdeutlichen, indem er z.B. zwischen dem Gehalt der Böden an organischer Substanz und der Austauschkapazität eine hochsignifikante, sehr enge Korrelation ($r = 0,988$) ermittelte.

Tab. 2.3.4.: Einfache Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen einigen Bodenvariablen von mehreren Standorten in Westnigeria (AGBOOLA, 1975)

Variable	Korrelationskoeffizient					
	P	K	Mg	Ca	org.Masse	KAK
K	0,632	-				
Mg	0,943**	0,524	-			
Ca	0,977**	0,562	0,965**	-		
org.Masse	0,982** ¹⁾	0,824*	0,981**	0,987**	-	
KAK	0,642	0,624	0,976**	0,982**	0,988**	-
% Ton	0,504	0,600	0,662	0,632	0,922**	0,574

1) war erst ab 2 % org. Masse signifikant

* signifikant

** hoch signifikant

b) Besonders auf Böden mit geringer mineralischer Austauschkapazität erfüllt die organische Substanz auch die Funktion eines Pufferungssystems für pH-Wert und Ionenkonzentrationen und regelt damit das Nährstoffgleichgewicht in der Bodenlösung.

c) Die organische Substanz ist ferner das Produkt einer "Bioakkumulation" von Nährstoffen im Oberboden. Sie ist also **Nährstoffträger**, denn das wenige Calcium und Magnesium und das verfügbare Phosphat sind auf Oxisolen und Ultisolen der Feuchttropen und Feuchtsavannen auf den humosen Oberboden konzentriert. So fand z.B. IPINMIDUN (1972), daß in den Savannenböden Nigerias 20 - 60 % des Phosphats in der organischen Masse akkumuliert waren.

Auch bis über 90 Prozent des gesamten Schwefels können in entkalkten Oberböden an die organische Substanz gebunden sein (SCHNITZER und KHAN, 1978). Mit dem Verlust der organischen Masse bzw. des Oberbodens sind diese Nährstoffe für das System meist verloren. Die Nährstoffkonzentration in den verwitterten Unterböden ist meist viel niedriger (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

d) Die organische Substanz erfüllt die Funktionen einer **langsam fließenden Nährstoffquelle** und schützt somit die Nährstoffe vor Auswaschung. Diese Funktion ist besonders in den immergrünen und halbimmergrünen Regenwaldgebieten und jahreszeitlich auch in den wechselfeuchten Gebieten von Bedeutung, darüber hinaus auf allen durchlässigen Böden (Sande, Oxisole).

e) Auf den eisenoxidreichen Böden trägt der Umsatz der organischen Substanz zur **Mobilisierung von Phosphat** bei (siehe 2.3.2.).

Auch auf calcimorphen Böden kann das der Fall sein, indem die organische Substanz H^+ -Ionen abgibt und Ca^{2+} -Ionen anlagert und somit die Löslichkeit von Calciumphosphaten erhöht.

Entsprechendes gilt für zur Düngung eingesetzte Rohphosphate (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

f) Auf Standorten, die zu Eisen- bzw. Aluminiumtoxizität neigen, **wirkt humifizierte organische Substanz** durch die Bildung überwiegend stabiler (hochmolekularer) Komplexe **toxischen Metallkonzentrationen entgegen** (ALLISON, 1973; SANCHEZ, 1976).

g) Die organische Masse **verbessert die Wasserhalte-Kapazität der Böden**, denn sie kann bis zum 3- bis 5fachen ihres Eigengewichtes an Wasser aufnehmen. YOUNG (1976) zitiert Ergebnisse aus Ghana, wo ein Rückgang der

organischen Substanz von 5 Prozent auf 3 Prozent (das kann schon nach 2 bis 3 Jahren Ackerbau der Fall sein) die Wasserkapazität von 57 auf 37 Prozent verringerte.

h) Fast auf allen Böden trägt die organische Substanz entscheidend zur **Strukturverbesserung** bei. Humus wirkt mit bei der **Aggregatbildung**. Die Tonhumuskomplexe sind ein guter **Schutz gegen die Erosion** durch Wind und Wasser und fördern die Permeabilität (bei gleichzeitiger Verbesserung der Wasserspeicherung) (YOUNG, 1976; SANCHEZ, 1976; LAL and GREENLAND, 1979).

i) Die organische Substanz ist sehr bedeutend als **Lebensraum und Ernährungsbasis für die Mikroorganismen** (Pilze, Bakterien) und Bodenlebewesen wie Regenwürmer und Termiten.

Als solches ermöglicht die organische Substanz eine kontinuierliche **Lebendverbauung** der Bodenteilchen (mikrobielle Ausscheidungen, Kotaggregate usw.), die sehr wichtig ist zur **Strukturerhaltung** (-verbesserung) und als Schutz gegen Erosion (GLIEMEROTH, 1958; KULLMANN, 1966; GRAFF und MAKESCHIN, 1979). Diese Funktion ist besonders bedeutend in Böden, die durch ihre mittelfeine Textur und die Trockenheit zu Beginn der Regenfälle zur Verschlammung und Erosion neigen.

j) Ein humoser, belebter Boden stellt überdies ein beachtliches **antiphytopathogenes Potential** dar. Vielfältige Antagonismen, Konkurrenz, Hyperparasitismen und antibiotische Ausscheidungen durch Raubnematoden, Pilze, Bakterien usw. wirken in einem belebten Boden dem einseitigen Überhandnehmen von pathogenen und bodenbürtigen Schädlingen entgegen (GARRETT, 1965; HUBER und WATSON, 1970).

Auch gibt es Hinweise darauf, daß durch hohe Humusgaben die Resistenz der Pflanzen gegen Schädlingsbefall verbessert wird (SCHAERFFENBERG, 1955) und daß eine Wuchsstoffwirkung von den Huminstoffen ausgehen kann (FLAIG, 1975).

2.3.3.2. Bemerkungen zur Humusdynamik

Die Pflege der organischen Substanz erfordert nicht nur ein Instrumentarium (auf das in den Kapiteln 4.1. bis 4.6. eingegangen wird), sondern auch einige Grundkenntnisse über die Dynamik der organischen Substanz in den Tropen.

Auf die engen Beziehungen zwischen Humusgehalt, Niederschlag (Bodenfeuchte) und Temperatur wurde bereits im Kapitel 2.3.1. hingewiesen. Nach JENNY und RAYCHAUDHURI (zit. in YOUNG, 1976) ist die Abhängigkeit von der Temperatur besonders eng bei jährlichen Niederschlägen von 750 bis 1000 mm (bei 1000 mm etwa + 0,5 % C bei einer Zunahme des Jahresniederschlags um 100 mm).

Bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 14° C scheint die Niederschlagshöhe wegen der nun reduzierten Oxidation von organischer Substanz nur noch von geringem Einfluß zu sein.

Die höheren Humusgehalte in den mäßig heißen Gebirgslagen (um 20° C) gegenüber den stets heißen Tieflandtropen lassen sich zum Teil auch aus der Tatsache heraus erklären, daß die meisten Pflanzen schon bei 20 bis 25° C optimal wachsen können - die bakterielle Zersetzung erreicht aber erst bei 30 bis 35° C ihr Optimum (MOHR und VAN BAREN, 1954).

Als dritter wichtiger Faktor ist der Tongehalt des Bodens zu nennen, der meist in relativ enger Beziehung zum Humusgehalt steht. So ermittelte z.B. JONES (1973) auf Böden in Westafrika eine enge Korrelation zwischen Ton- und Humusgehalt, und auch AGBOOLA (1975) fand in Westnigerias Böden eine solche Abhängigkeit (siehe Tabelle 2.3.4. sowie BIRCH und FRIEND, 1956; YOUNG und STEPHEN, 1965; JAGNOW, 1967). Nach FLAIG (1975) ist die Schutzwirkung von Tonmineralen auf den Humus nur gegeben, wenn es sich um Dreischichttonminerale handelt, nur Kaolinit und Quarz zeigten keinen Effekt.

Die Dynamik von Humusabbau und Humusbildung ist in den Tropen intensiver als in gemäßigten Klimaten. In feuchtwarmen Perioden erfolgt der Abbau in der Regel sehr schnell (je nach Zustand des Bodens, Luft- und pH-Verhältnissen). In den Trockenperioden kommt er durch Reduzierung der biologischen Aktivität weitgehend zum Stillstand.

In der folgenden Tabelle (2.3.5.) sind die wichtigsten Prozesse und Faktoren zusammengestellt, die auf den C-Gehalt Einfluß nehmen.

Tab. 2.3.5.: Die wichtigsten Prozesse, die den Humusgehalt des Bodens beeinflussen (nach YOUNG, 1976; leicht verändert)

- Prozesse, die die Vegetation (den Biomasseanteil) beeinflussen:	
Photosynthese	} Pflanzenwachstum
Respiration	
Nährstoffaufnahme	
Stofftransport	
Streuanfall	} Absterben von Pflanzen
Holzfall	
Wurzelausscheidungen	
Brennen	
- Prozesse, die die Streu beeinflussen:	
Abbau (Zersetzung)	
Humifizierung	
Oxidation	
Erosion	
Brennen	
- Prozesse, die auf tote Wurzeln Einfluß nehmen:	
Humifizierung	
Oxidation	
- Prozesse, die auf Bodenhumus Einfluß nehmen:	
Mineralisation	
Oxidation	
Erosion	
Auswaschung	
- Prozesse, die durch den Menschen verursacht oder beschleunigt werden:	
Brennen	
Vegetationsrodung	
Landwirtschaftliche Aktivitäten	
- Verluste:	- Ernte der Pflanzen
	- Beweidung
	- Begünstigung der Oxidation (z.B. häufige Bearbeitung, Belüftung)
	- völlige Unkrautunterdrückung
- Gewinne:	- natürliche oder intensivierte Brachen
	- Ernterückstände
	- Einarbeitung oder Belassen von Mulch
	- Stallmistgaben
	- Kompostgaben
	- (Gründüngung)
	- Feld-Gras-Fruchtfolgen

An dieser Stelle soll nur auf einige Punkte eingegangen werden, da die weiteren Prozesse in anderen Kapiteln angesprochen werden. (Die folgenden Angaben sind überwiegend nach Daten von NYE und GREENLAND (1960) und YOUNG (1976) zusammengestellt.)

Etwa 10 bis 20 Prozent der organischen Biomasse werden zu Humus umgebildet, während 80 bis 90 Prozent durch Oxidation als CO₂ verloren gehen. Für unterirdische Pflanzenteile ist die Oxidation geringer, so daß etwa 20 bis 50 Prozent als Humus zurückbleiben.

Mineralisation und Oxidation, also die Freisetzung anorganischer Ionen und die Produktion von CO₂, sind die bestimmenden Prozesse des Humusabbaus.

C-heterotrophe Mikroorganismen verbrauchen und transformieren organische Substanz. Durch Inkorporation anorganischer Ionen wirken sie der endgültigen Mineralisation gewissermaßen entgegen, was bei weiten C/N-Verhältnissen (> 20 : 1) - aber auch bei weiten C/P-Verhältnissen (> 200:1) - im Boden zu vorübergehender Festlegung (Immobilisierung) dieser Nährstoffe führen kann. (N- bzw. P-Sperre ist vor allem zu befürchten, wenn die Pflanzen ihre vegetative Hauptentwicklung durchlaufen, während Mikroorganismen N und P aus der Bodenlösung aufnehmen, um etwa Stroh zu zersetzen (HOWARD, 1943).)

SANCHEZ (1976) vermutet außerdem, daß das Fehlen von pflanzenverfügbaren Nährstoffen, etwa von P in Andosolen (siehe unten) oder P und Ca in Ultisolen, die Akkumulation von Humus durch Hemmung der Mikroorganismen fördern kann und zitiert in diesem Zusammenhang Untersuchungen aus den USA, wo P- und Ca-Düngung auf Mangelböden höhere C-Abbauraten zur Folge hatte. Auch AGBOOLA (1981) beobachtete auf einem Alfisol nach mineralischer Düngung erhöhten C-Abbau.

Vorhersagen zur Humusdynamik sind schwierig und stets problematisch.

Die Angaben der Tabelle 2.3.6. sind langjährige Durchschnittswerte und entsprechen vor allem in der ersten Zeit der Inkulturnahme kaum den tatsächlichen Abbauraten, die fast immer wesentlich höher liegen.

YOUNG (1976) zitiert zahlreiche Untersuchungen, wo die Abbauraten des Bodenumus in den ersten 2 bis 3 Jahren bei durchschnittlich 10 bis 20 Prozent lagen. Auf Ultisolen im Amazonasbecken betrug der Humusabbau im ersten Jahr der Inkulturnahme 25 % (SANCHEZ et al., 1982).

Tab. 2.3.6.: Geschätzte Abbauraten der organischen Substanz des Bodens unter Brache und unter Kultur. (Durchschnittliche Angaben nach NYE und GREENLAND, 1960; Werte in Klammern nach SANCHEZ, 1976)

Abbauraten in %/Jahr	Zone I (Regenwald)	Zone II (Feuchtsavanne)	Zone III (Trockensavanne)
unter Brache	3,0 (2-5)	0,9 (1,2)	0,8 (1,2)
unter Ackerkulturen	3,3	4,5	4,5

Auch in den Savannen liegen die Werte in der ersten Zeit nach der Inkulturnahme oft über 10 Prozent.

Nach einigen Jahren der Kultur geht die Intensität des Umsatzes zurück, es findet also so etwas wie eine negative Rückkopplung statt.

Auf einem roten Oxisol im Senegal zum Beispiel erreichten die Abbauraten einen Wert von 2,9 Prozent zwischen dem 3. und 15. Jahr und von 0,4 Prozent vom 16. bis 50. Jahr (SIBAND, 1972).

Das bedeutet: Je mehr sich der Humusgehalt von seinem optimalen "Gleichgewichtsgehalt" entfernt, desto weniger schnell wird der Humus abgebaut (Abb. 2.3.g.).

Der Umfang des Humusabbaus in den Tropen übertrifft den der gemäßigten Klimate und kommt erst etwa bei Gehalten von 30 (-40) Prozent des Ausgangsgehalts zu einem "relativen" Stillstand. Das sind Werte, die nach YOUNG (1976) weit unter den wünschenswerten Gehalten liegen.

Die wünschenswerten C-Gehalte lassen sich (zumindest im tropischen Tiefland) nur über eine gezielte Humuswirtschaft erreichen, was unter anderem durch Arbeiten von RANGANATHAN et al. (1980) und AGBOOLA und COREY (1973) gezeigt werden konnte. Traditionell war und ist die Buschbrache ein Mittel, um den Humusstatus des Bodens wieder zu verbessern, wobei diese und andere Maßnahmen um so wirksamer sind, je weiter der Boden von seinem optimalen C-Gehalt entfernt ist.

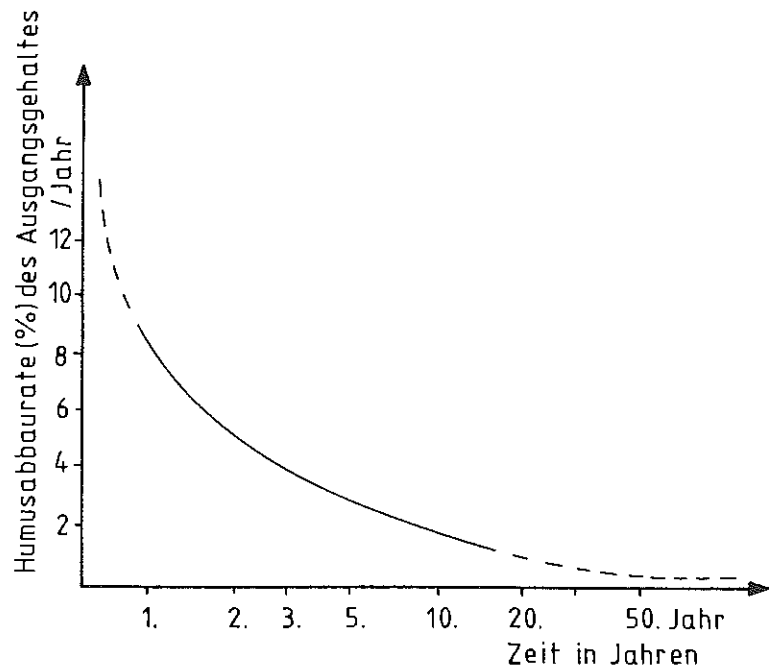


Abb. 2.3.g.: Schematische Darstellung der Dynamik des Humusabbaus nach Inkulturnahme eines Bodens unter natürlicher Vegetation

Tab. 2.3.7.: Humusgehalt von tropischen Böden (Oberboden) in zonaler Sicht (angenähert nach YOUNG, 1976)

	Zone I (Regenwald)	Zone II (Feuchtsavanne)	Zone III (Trockensavanne)
Humus in % unter natürlicher Vegetation	3-5	2-3	1-2
Humus in % beim Anbau annueller Kulturen ohne spezielle Maßnahmen	1-1,6	0,6-1	0,3-0,6
Wünschenswerter C-Gehalt in %	2-3,5	1,2-2	0,6-1,2

Anhand des Modells von NYE und GREENLAND gibt YOUNG (1976) folgende vereinfachte Formel, die diesen Sachverhalt zum Ausdruck bringt:

$$I = A - p A = A (1 - p),$$

wobei:

- I (= increase) die Zunahme des Humusgehalts,
- A (= addition) die Zufuhr an Humus zum Boden und
- p = Annäherungsfaktor an den Humusgehalt unter natürlichen Bedingungen bedeutet.

Das heißt, wenn $p = 1$, dann ist kein echter Zuwachs zu erwarten, der Boden wird den zugeführten Humus bald umgesetzt haben (reine Nährstoff- und Strukturfunktion; biologische Funktion).

Ist aber $p = 0,5$, so hat der Boden nur die Hälfte seines optimalen Humusgehaltes, und es ist damit zu rechnen, daß etwa $A (1 - 0,5) = 0,5 A$, also die Hälfte des zugeführten Humus, zur Anhebung des Humusniveaus des Bodens wirksam wird.

Zur Erfassung der wirklichen Verhältnisse ist diese Formel in der Regel zu einfach und gilt auch nur innerhalb gewisser Grenzen (Näheres siehe YOUNG, 1976 und RANGANATHAN et al., 1980). Aber auch wenn man unterstellt, daß die Formel nur annähernd die Realität beschreibt, so wird doch deutlich, wie sehr die Humuswirkung einer Düngungsmaßnahme vom bereits bestehenden Humusniveau eines Bodens beeinflusst wird.

Abb. 2.3.h. verdeutlicht schematisch diesen Zusammenhang. (In der Realität ist kaum eine lineare Beziehung zu erwarten.)

Eine Steigerung des Humusgehalts auf mehr als 75 Prozent des Gehalts unter natürlicher Vegetation kann bei Ackerbau kaum erreicht werden, oder ist, was den Aufwand anbelangt, betriebswirtschaftlich nicht mehr zu vertreten (YOUNG, 1976).

Im folgenden soll anhand des NYE-GREENLAND-Modells deutlich gemacht werden, wie sich Kultur und Brache in verschiedenen Zonen der Tropen auf die Humusdynamik auswirken, wenn das System darauf abzielt, etwa ein Humusniveau von 75 Prozent des Ausgangsgehaltes aufrechtzuerhalten. Der jährliche Brachegewinn (Zuwachs) ist nach Daten von NYE und GREENLAND (1961) geschätzt.

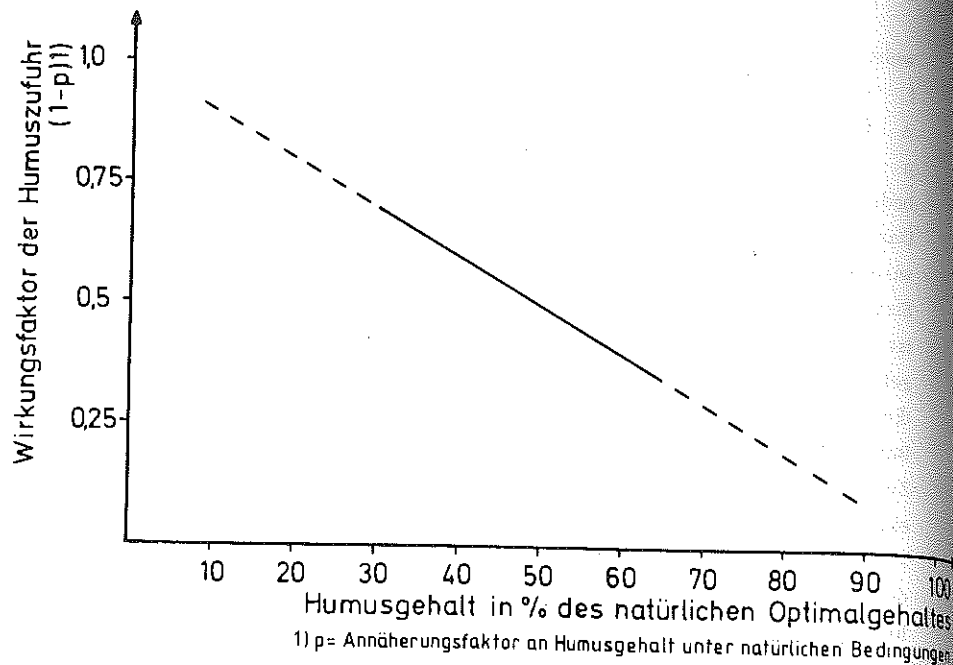


Abb. 2.3.h.: Zusammenhang zwischen dem relativen Humusgehalt von Böden und der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Humusergänzung

Die Verluste ergeben sich aus folgender Verlustformel:

$$\text{Verlust in } x \text{ Kulturjahren} = K_K \times p \times C_G \times E_k$$

- K_K : Humuszersetzungskonstante (z.B. 0,03 = 3 %)
- p: Annäherungsfaktor an das natürliche Gleichgewicht (siehe oben)
- C_G : Humusgehalt im natürlichen Gleichgewicht (in kg/ha)
- E_k : Jahre Kultur

Tab. 2.3.8.: Wiederherstellung der Gehalte von organischer Masse unter natürlicher Brache (modifiziert nach YOUNG, 1976); Angaben in kg/ha

	Zone I (Regenwald)	Zone II (Feuchtsavanne)	Zone III (Trockensavanne)
Humusverlust des Ackerbodens in 3 Kulturjahren	4000	4500	1350
in Prozent	6,5	9,0	9,0
durchschnittlicher jährlicher Brachegewinn ¹⁾	250-600	70-160	20-50
nötiger Zeitraum zur Kompensation der Verluste ¹⁾	7-16 J.	28-64 J.	27-67 J.

- 1) 1. Zahl bei Annahme einer Humusausbeute von 10 % aus organischer Trockenmasse
2. Zahl bei Annahme einer Humusausbeute von 25 % aus organischer Trockenmasse

Obwohl die rechnerischen Grundlagen nur sehr grob der Realität gerecht werden, so stimmt doch das Ergebnis mit Erfahrungswerten über Shifting-Cultivation weitgehend überein.

Deutlich wird auch, daß die Naturbrache in den immerfeuchten Tropen wesentlich effektiver ist als in den wechselfeuchten Gebieten.

Tabelle 2.3.9. zeigt abschließend zu diesem Themenkomplex Meßwerte zur Humusdynamik in einem Ackerboden im Süden Senegals, wie sie von SIBAND (zit. in CHARREAU, 1975) für verschiedene Jahre nach Inkulturnahme eines Waldbodens ermittelt wurden.

Hier betrug die relative Humusabbaurate in den ersten drei Jahren durchschnittlich 5,4 %; vom 3.-12. Jahr betrug sie durchschnittlich 1,7 % pro Jahr, vom 12.-46. Jahr 1,2 % und vom 46.-90. Jahr 1,1 %.

In Prozent des Ausgangsgehaltes ausgedrückt betrug der Humusschwund in den ersten drei Jahren durchschnittlich ebenfalls 5,4 %, in den letzten 44 Jahren dagegen nur noch etwa 0,4 % des Ausgangsgehaltes (siehe Abb. 2.3.g.).

Die Tabelle verdeutlicht überdies noch einmal anschaulich, wie die oben bereits erwähnten negativen Auswirkungen des Humusschwundes wichtige, fruchtbarkeitsbestimmende Eigenschaften des Bodens verändern. So ging zum Beispiel parallel zur Abnahme der organischen Substanz um 70 % die Kationenaustauschkapazität (KAK) um 68 % zurück.

Tab. 2.3.9.: Entwicklung einiger wichtiger Bodeneigenschaften nach der Inkulturnahme eines Waldbodens (in 0-10 cm) nach 0-90 Jahren Ackerbau im Süden Senegals (SIBAND, 1972, zit. in CHARREAU, 1975)

Zeit nach Inkulturnahme	C-Gehalt %	C/N-Verhältnis	Ton %	Verfügbares Wasser	KAK m.e./100 g Boden	pH
0	1,65	18,3	11,1	4,1	7,8	6,3
3	1,38	17,5	10,2	4,7	5,2	6,0
12	1,16	17,0	10,5	3,7	3,2	5,9
46	0,68	15,8	9,0	2,8	2,0	6,0
90	0,35	14,3	7,4	3,3	1,6	5,9

Oft wird die Ansicht vertreten, daß der Humus in den Tropen anderer Natur sei als in den gemäßigten Klimaten.

SCHNITZER (1977) konnte beim Vergleich von Huminstoffen aus verschiedenen Klimaten keine grundsätzlichen Unterschiede feststellen, so daß davon ausgegangen werden muß, daß der Humus in den Tropen grundsätzlich ähnliche Eigenschaften und Verhaltensweisen - etwa in bezug auf den pH-Wert des Bodens oder das Ausgangsmaterial - zeigt wie in den gemäßigten Klimaten.

Einige Faustzahlen zur organischen Substanz in Böden:

- Bei Bodendichte 1 hat 1 cm Bodenaufgabe ein Gewicht von 100 t/ha
- bei 1 % Humusgehalt entspricht das 1000 kg Humus/ha oder in etwa 500 kg organischem Kohlenstoff (C)1)
- bei einem C/N-Verhältnis von 10:1 entspricht das ca. 50 kg N/ha

Durch Multiplikation läßt sich leicht der jeweils gesuchte Wert errechnen.

1) Umrechnungsfaktor: Humus $\frac{\times 0,58}{\times 1,72}$ org. C.

Beispiel:

- 30 cm Oberboden $\hat{=}$ 3000 t/ha bei Dichte 1
- $\hat{=}$ 4500 t/ha bei Dichte 1,5
- 2 % Humus in den oberen 30 cm Boden $\hat{=}$ 90000 kg Humus/ha
- $\hat{=}$ 45000 kg C

das entspricht bei einem C/N-Verhältnis von 10:1 = 4500 kg N/ha
das entspricht bei einem C/N-Verhältnis von 15:1 = 3000 kg N/ha

Zur Austauschkapazität von Humus und zum Beitrag des Humus zur KAK der Böden:

Humus hat je nach Zusammensetzung und pH-Wert des Bodens eine (KAK) Kationenaustauschkapazität von etwa 150-350 m.e. pro 100 g.

Annahme: pro pH-Einheit steigt die KAK von Humus zwischen pH 4 und pH 8 um durchschnittlich 50 m.e./100 g an.

- dann gilt: Humus bei pH 4: 100 m.e. KAK/100 g
- Humus bei pH 5: 150 m.e. KAK/100 g
- Humus bei pH 8: 300 m.e. KAK/100 g

Beispiel:

Hat ein Boden bei pH 5 ein Prozent Humus, so entspricht das einem Beitrag des Humus zur KAK von

$$\frac{150 \text{ m.e.}}{100} = 1,5 \text{ m.e./100 g Boden}$$

bei 2 % Humus von

$$\frac{150 \times 2 \text{ m.e.}}{100} = 3,0 \text{ m.e./100 g Boden etc.}$$

2.3.4. Wichtige tropische Böden und ihre Systematik

Die Fortschritte in der Kenntnis und Systematik der tropischen Böden machen es dem Nicht-Fachmann oft schwer, sich bei wechselnder oder auch immer wieder neuer Namensgebung zu orientieren.

Dazu kommen unterschiedliche Klassifikationssysteme, die den internationalen Vergleich erschweren.

2.3.4.1. Latosole

Eine Bodenbezeichnung, die sehr häufig - und oft mit anderem Inhalt - gebraucht wird, ist der "Latosol", der im folgenden kurz erläutert werden soll.

Nach KELLOGG (1949) bezieht sich der Begriff Latosol auf fast alle typisch zonalen Böden der feuchten Tropen. Hohe Auswaschungs- und Verwitterungsintensität führen zu den charakteristischen Merkmalen der intensiven Färbung und tiefgründigen Verwitterung (siehe 2.3.1.1.).

Die allgemein gehaltene Definition von KELLOGG (1949) erstreckt sich sowohl auf typisch tropische Waldböden als auch auf Savannenböden, die pedogenetisch als sehr alt anzusehen sind. In ihnen sind Salze und Calcium vollkommen, Alkali-, Erdalkalimetalle und Kieselsäure sehr stark ausgewaschen.

Fe-, Al-Oxide, Gibbsite und Kaolinit sind sehr stark angereichert.

Die Böden haben pH-Werte unter 5,5.

Der Oberboden besitzt ein stabiles, erdiges Gefüge, hohe Wasserleitfähigkeit, gute Durchwurzelbarkeit und gute Luftverhältnisse.

Nährstoffarmut (KAK < 15 m.e./100 g), geringe nutzbare Wasserkapazität, Phosphatfixierung und Aluminium- bzw. auch Eisentoxizität können stark das Pflanzenwachstum behindern.

Im Extremfall kommt es im Unterboden - auf erodierten Böden auch an der Oberfläche - durch Austrocknung zu irreversibler Lateritbildung (lat. later = Ziegel). Nach MARTIN und DOYNE (1927) geschieht das, wenn das Verhältnis von SiO_2 zu Al_2O_3 kleiner als 2 ist.

Die Lateritbildungen, im Englischen als "Ironstone" oder "Hardpan" bezeichnet, entstehen oft am Grenzsaum, des aufsteigenden Grundwassers zum trockenen Boden, oder die Sesquioxide (Fe-, Al-Oxide) treten mit dem Hangzugwasser an die Oberflächen und verhärteten.

Nach BURINGH (1979) und SANCHEZ (1976) handelt es sich nur bei 7 Prozent der tropischen Böden (mehr in Afrika) um echte Laterite.

Nach der FAO-Nomenklatur muß ein solcher Boden (Laterit) in 0 - 125 cm Tiefe einen eisenreichen, tonreichen und rotgefleckten B-Horizont aufweisen, der bei Austrocknung (nach Rodung oder Entwässerung z.B.) irreversibel verhärtet kann; er wird dann als "plinthic horizon" bezeichnet.

Ist der B-Horizont mit runden (von feiner Matrix umgebenen) Fe-Konkretionen (Eisenkörpern) angereichert, wird er als "ferric" bezeichnet. Sind die Konkretionen umfangreicher bis bankartig, verwendet man die Bezeichnung "plinthic" (plinthic horizon). In der US-Soil-Taxonomy (1975) erhalten solche Böden die Vorsilbe "Plinth".

Latosole treten im Bereich der Ferralsole, Acrisole, Luvisole und Gleysole auf (Beschreibung dieser Böden nach der FAO-Nomenklatur siehe unten).

Nach der US-Systematik treten sie vornehmlich in Oxisolen, Ultisolen und Alfisolen der Tropen auf.

In zentraler Betrachtung sind Latosole Böden der feuchten und wechselfeuchten Tropen.

Nicht immer jedoch wird der Begriff Latosol im Sinne der oben genannten Entsprechungen gebraucht, sondern er bezieht sich oft im weiteren Sinne und ganz allgemein auf tropische Böden, die stark verwittert, ausgewaschen und nährstoffarm sind. Wird er in diesem Sinne gebraucht, bezieht er sich aber auf 51 % der tropischen Böden und ist deshalb auch wenig aussagekräftig (SANCHEZ, 1976). Um Unklarheiten und Mißverständnisse zu vermeiden, sollte der Begriff deshalb in Zukunft möglichst ganz vermieden werden.

2.3.4.2. Die Klassifikation von Böden nach dem FAO-System

Die Klassifikation von Böden ist international gesehen ein kontroverses Thema. Ähnliche oder gleiche Begriffe sind oft unterschiedlich definiert: Nomenklaturen weichen voneinander ab, und unterschiedliche Sprachen erschweren einen Vergleich noch zusätzlich (siehe hierzu auch FAO, 1960). Die von der FAO/UNESCO (1971-1978) herausgegebene "Soil map of the world" ist die erste einheitliche Weltbodenkarte.

Sie ist noch relativ ungenau ($1/4 \text{ cm}^2 \hat{=} 6250 \text{ ha}$), und nur von einzelnen Regionen existieren genauere Karten. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß sie sich weltweit durchsetzen wird, zumindest zur international groben Kartierung und zum Vergleich.

Der Weltbodenkarte liegt keine einheitliche Systematik zugrunde, sondern sie ist anhand nationaler Bodenkarten in Anlehnung an das US-System zusammengestellt. In einem Gebiet zusammen vorkommende Böden, die untereinander eine gewisse Beziehung aufweisen, werden dabei zu "Assoziationen" ($\hat{=} \text{Major soil units}$) zusammengefaßt.

Im folgenden sind einige dieser Einheiten mit den allgemein wichtigsten Charakteristika kurz aufgeführt.

Außerdem sind einige wichtige Begriffe erläutert, die zur Charakterisierung verwendet werden (in Anlehnung an BURINGH, 1979, und andere).

Histosole (0)

Alle organischen Böden oder Torfböden mit einer organischen Auflage von ≥ 40 cm.

Mindestgehalt an organischer Masse: 20 bis 30 %, je nach Tongehalt.

Etwa 1 % der tropischen Böden sind Histosole.

Histosole sind problematisch für die Landwirtschaft, da meist naß. Nach Drainage ist Nutzung - in Verbindung mit schnellem Humusschwund - möglich. Kleinflächig auftretende Histosole werden oft als Gemüsebauflächen genutzt, sonst als Flächen zur Reedproduktion (*Cyperus*, *Phragmites*).

Lithosole (I)

Sehr flachgründige Böden (< 10 cm Mächtigkeit) auf Festgestein.

Diese Böden haben ein sehr geringes durchwurzelbares Bodenvolumen und bieten Nutzpflanzen nur wenig Ausbeutungspotential (Wasser, Nährstoffe). Sie trocknen schnell aus. Wo reichliche Niederschläge fallen, muß die geringe Auflage gegen Erosion geschützt werden (etwa geringe Bestockung bei Weiden, um die Narbe zu schützen).

Bäume können mit ihren Wurzeln noch am ehesten auch in tiefere Schichten vordringen und sind neben Sträuchern oft die angemessene Nutzungsform.

Vertisole (V)

Sehr schwere Tonböden (≥ 30 % Ton), die in Trockenzeiten (mindestens 3-4 Monate) tiefe und breite Risse aufweisen.

Im Oberboden haben sie ein charakteristisches Mikrorelief (Gilgai). Im Unterboden treten durch Quellung und Schrumpfung der reichlich vorhandenen 2:1 Tonminerale glatte Scherflächen auf (engl.: *slikensides*).

Auftreten: Bevorzugt in abflußträgen Senken oder in weiten Ebenen wechselfeuchter Klimate; pellic V.: dunkle Vertisole; chromic V.: übrige Vertisole.

Die Vertisole zeichnen sich durch hohe Basensättigung und hohe KAK (bis 60 m.e./100 g Boden) aus. Im Normalfall besitzen sie eine hohe aktuelle und potentielle Nährstoffkapazität.

Trotz dunkler Farbe besitzen sie nur 1 bis 3 Prozent organische Substanz; der pH-Wert liegt bei ≥ 6 .

p- und K-Verfügbarkeit sind zum Teil eingeschränkt.

Die physikalischen Eigenschaften der Vertisole sind schlecht.

Die starke Quellungsfähigkeit führt leicht zu Staunässe und macht eine Bearbeitung im feuchten Zustand fast unmöglich. Gleiches gilt für den trockenen Vertisol, der stark verhärtet.

Durch Be- und Entwässerung können die Böden verbessert werden (optimaler Feuchtezustand).

Eine Düngung lohnt sich. Organische Düngung ist wesentlich zum Erhalt und zur Verbesserung der Fruchtbarkeit, da durch sie die dichtgelagerten Böden in ihrer Struktur verbessert werden (YOUNG, 1976).

Die traditionelle Nutzung ist wegen der schwierigen Bearbeitbarkeit oft Weideland oder, bei intensiver Wirtschaftsweise, Schnittgras- oder Feldfutternutzung.

Dabei können bei kleinflächigen Vertisolen die im Tal angereicherten Nährstoffe via Viehdung wieder auf die ausgelaugten Hänge gebracht werden, wodurch diese - leicht bearbeitbaren - Böden fruchtbar werden (Kreislauf). (Siehe hierzu auch LUDWIG, 1967 und MILNE, 1947.)

Fluvisole (J)

Junge, alluviale Ablagerungen in Flußtäälern, Deltas und Küstenregionen mit noch geringer oder fehlender Bodenentwicklung.

Keine Horizonte, außer "ochric"-, "histic"- und "sulfric"-horizonte (siehe unten).

Die natürliche Ertragsfähigkeit hängt stark vom Ausgangsmaterial ab, das sedimentiert wurde (junges, basenreiches Material oder basenarmes bzw. verwittertes Material).

Allgemein zählen die Fluvisole (wie z.B. im Indus- und Gangesdelta) zu den ertragfähigsten tropischen Standorten (günstige Topographie, Verkehrslage, Bewässerungsmöglichkeiten, Entwässerung usw.).

Die Profile wechseln oft auf sehr engem Raum. Tonschleier, Kalkhorizonte, Salinitätsgefahr (insbesondere bei Bewässerung in Savannenklimate) und

mangelnde Wasserführung oder hoher Grundwasserstand können die Durchwurzelbarkeit und Ertragsfähigkeit einschränken. Mit vorübergehender Staunässe muß auf den meisten Fluvisolen gerechnet werden.

Bei intensiver Nutzung, die oftmals zu Nährstoffverarmung, Humusschwund und Strukturverschlechterung geführt hat, ist auf die Erhaltung des Nährstoffzustandes und der organischen Masse zu achten, um das biologische Potential dieser Böden langfristig nutzen zu können (Permeabilität, Bearbeitbarkeit usw.).

Häufig sind Reis, Jute, Zuckerrohr, Frucht- und Gemüseanbau, aber auch Getreide und Faserpflanzen werden auf Fluvisolen angebaut.

(Siehe hierzu auch FAO, 1981.)

Solonchaks (Z)

Strukturlose Salzböden mit freien Salzen (oft Salzanhäufung an der Oberfläche).

Sie treten in ariden Gebieten auf und haben meist einen hohen Grundwasserstand mit einem hohen Salzgehalt (Chloride, Sulfate).

Solonetz (S)

Stark alkalische Böden ($\text{pH} \geq 8,5$) mit mehr als 15 Prozent Na-Sättigung; typisches Säulengefüge des B-Horizonts.

Gleysole (G)

Böden, die durch Hydromorphiemerkmale (Wassereinfluß) gekennzeichnet sind (in 0 - 50 cm).

Sie stehen fast ganzjährig unter Stauwassereinfluß und weisen unter einer zum Teil hohen organischen Auflage eine mürbe, helle Tonschicht auf, die dann in den Staukörper übergeht, der typische blaugraue Mangankonkretionen aufweist. Die KAK ist mittelmäßig, die P- und K-Gehalte sind meist überdurchschnittlich.

Auftreten: In Depressionen und Ebenen der immerfeuchten und wechselfeuchten Gebiete; oft stark unterschiedlich im Charakter (mollic, plinthic usw.).

Die landwirtschaftliche Nutzung wird durch den dichten Staukörper, anaerobe Verhältnisse und schwierige Bearbeitung erschwert. Nur flachwurzelnde Pflanzen und solche, die Stauwasser tolerieren, sind geeignet (Ölpalme,

Napier-Gras, Sao-Palmen und andere).

Traditionell werden Gleysole oft als gute Weiden genutzt. MILNE (1947) schlägt intensiven Futterbau vor (siehe Vertisole).

Andosole (T)

Böden, die aus vulkanischen Aschen entstanden sind.

Häufig mit mächtigem, dunkel-humosem Oberboden (bis 30 Prozent organische Masse).

Die spezifische Dichte (ca. $0,85 \text{ g/cm}^3$) ist gegenüber sonstigen Böden (ca. 1,4 bis $1,6 \text{ g/cm}^3$) sehr gering.

Die Andosole haben meist eine gute Wasserführung und eine hohe nutzbare Wasserkapazität. Durch anhaltende Verwitterung werden immer wieder Nährstoffe freigesetzt, so daß die Andosole eine permanente Nutzung erlauben.

Andosole treten vor allem in Gebirgslagen der humiden Tropen auf (Indonesien, Südamerika, Ostafrika).

Saure Reaktion und P-Mangel (z.T. P-Sorption an Allophan und Ton-Humuskomplexen) begrenzen oft die Produktivität (siehe Kapitel 2.3.2.).

Kalkung kann über pH-Anhebung und Verbesserung der aktuellen Sorptionseigenschaften saure Andosole, die durch Allophane und den Humus eine hohe variable Ladung besitzen, verbessern (siehe Abb. 2.3.i.).

In Hanglagen sind unbedingt Erosionsschutzmaßnahmen zum Schutz der wertvollen Böden zu ergreifen.

Arenosole (Q)

Sandige Böden mit unterschiedlichen B-Horizonten, die diagnostisch unterhalb der Definitionsschwelle liegen (mäßig ausgeprägt).

Die Arenosole umfassen Böden aus mehreren Gruppen; geringer Tongehalt und hoher Sandgehalt (mehr als 50 Prozent) geben diesen Böden besondere Eigenschaften.

Die Sande und lehmigen Sande (siehe Abb. 2.3.b.) sind relativ strukturlos, leicht zu bearbeiten und haben meist geringe C-Gehalte. Sie haben eine gute Durchwurzelbarkeit und Wasserführung, trocknen aber auch sehr schnell aus.

Unter etwa 1000 mm Jahresniederschlag haben sie eine Basensättigung von mehr als 40 Prozent mit schwach saurer bis neutraler Reaktion. Über

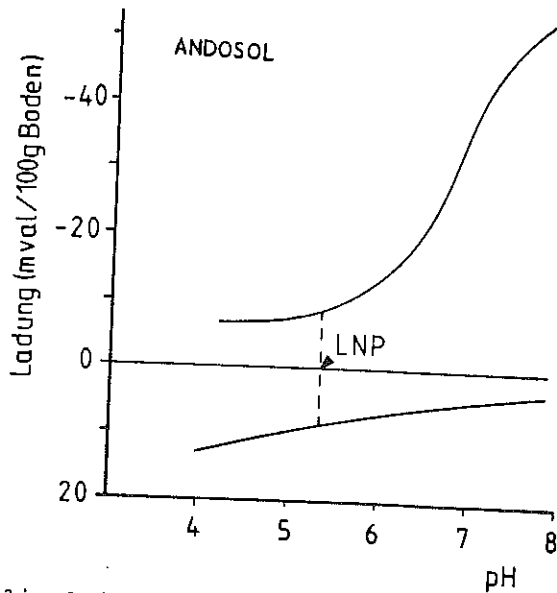


Abb. 2.3.i.: Ladungsverhältnisse eines Andosols (Unterboden) aus Rhyolit, Neuseeland. Tonfraktion: ca. 100 % Allophan (aus SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982)

1000 mm Jahresniederschlag sind die Arenosole meist sauer bei einer Basensättigung von weniger als 40 Prozent (YOUNG, 1976). Bei der Bewirtschaftung muß dem Erhalt der organischen Substanz Rechnung getragen werden (keine Intensivierung des Abbaus durch häufiges Bearbeiten). Durch Stallmistgaben lassen sie sich verbessern. Tiefwurzeln Pflanzen sind besser geeignet als Flachwurzler.

Podsole (W)

Im Oberboden, unter Rohhumusaufgabe, stark gebleichte, sandige Böden mit einem gebleichten, weißgrauen E-Horizont, bei denen Humuskolloide und Sesquioxide im B-Horizont akkumuliert und zementartig verhärtet sind

(Verhärtung aus Humin und Fe, Al). Podsole entstehen in den Tropen nur auf armen Quarzsanden, zum Teil auch kleinflächig in Berglagen auf Ton-schiefer.

Die Böden sind stark sauer und nährstoffarm und haben kaum landwirt-schaftlichen Nutzen.

Sie sind oft mit einer typisch azidophilen Vegetation bestanden (z.B. Rhododendren) und können allenfalls als sehr extensives Forst- oder Weide-land genutzt werden.

Ferralsole (F)

Tief verwitterte, einheitlich rote, gelbrote oder gelbe Böden, die haupt-sächlich aus Kaolinitton (durch Eisen-Oxide verkittet), Sesquioxiden und Gibbsit bestehen.

Ferralsole sind typische Böden der immerfeuchten Tropen.

Das infolge starker Auswaschung und Verwitterung vollständige Fehlen (noch) verwitterbarer Minerale - bis in 2 m Tiefe und mehr - hat zur Folge, daß die Böden arm an Nährstoffen sind.

Die KAK liegt unter 16 (bis 20) m.e. pro 100 Gramm Ton, die KAK des Bodens insgesamt meist unter 10 m.e./100 g, die pH-Werte liegen meist unter 5 (5,5).

Die Profile sind sehr tief, einheitlich verwittert und ausgewaschen (bis 50 m und tiefer).

Nach der FAO-Systematik haben die Böden einen B-Horizont, in dem Eisen-oxide angereichert sind ("oxic").

Die Struktur und die Färbung der Böden zeigen im Profil keine deutliche Differenzierung (einheitliches Profil).

Typisch ist eine mürbe Struktur; blockige Strukturen zerfallen bei Druck sehr leicht zu weich-mehlig (engl.: "floury") Konsistenz. Glänzende Ton-häutchen fehlen völlig (vgl. Nitosole).

Normalerweise haben Ferralsole eine hohe Wasserleitfähigkeit, günstigen Lufthaushalt und sind leicht durchwurzelnbar.

Diese günstigen Eigenschaften kontrastieren mit zum Teil geringer nutzbarer Wasserkapazität und Nährstoffarmut (neben N insbesondere P und zum Teil auch S). Außerdem treten Eisen- und auch Aluminiumtoxizität auf.

Annuelle Kulturen sind nur mit höchstem Risiko anzubauen, da sie zu einem schnellen Verlust der organischen Substanz (2 bis 5 %), zu Erosion und zum

Verlust der Bodenfruchtbarkeit - schon nach 2 bis 3 Jahren - führen, die unter natürlicher Vegetation relativ gut sein kann.

Längerfristig sind nur Buschbrachesysteme mit langen Brachezeiten oder waldähnliche Nutzungsformen möglich, die das enge Kreislaufsystem der Nährstoffe geschlossen halten und den Boden dauernd bedecken. Auch dann noch müssen Nährstoffexporte gering gehalten werden. Lediglich der Export von Kohlenhydraten scheint langfristig den ökologischen Verhältnissen angemessen.

Wenn Düngung erfolgt (etwa in Ölpalmen), so wird sie auf humusreichen Ferralsolen viel besser genutzt (BURINGH, 1979).

Kalkung kann Eisen- und Aluminiumtoxizität unterbinden (siehe auch VAN WARMBEKE, 1974; ROOSE, 1981).

Nitsole (N)

Kräftig rot bis rotbraun gefärbte, lessiviert¹⁾, tonreiche Böden feuchtheiße Gebiete mit einem Tonanreicherungshorizont, der keine abrupten Übergänge zeigt und nach unten hin allmählich tonärmer wird.

Nitsole haben keine hydromorphen, lateritischen oder vertisolähnlichen Horizonte, sondern weisen ein einheitliches, tiefes Profil auf, das eine gute Durchwurzelung erlaubt und eine hohe nutzbare Wasserkapazität besitzt. Sie sind aus basenreichen Gesteinen (z.B. Basalt, Glimmerschiefer) entstanden und haben noch Reste verwitterbarer Minerale (2:1), die in begrenztem Umfang Nährstoffe nachliefern können (Kaolinit dominiert).

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) liegt bei etwa ≥ 20 m.e. pro 100 Gramm Ton.

Der Name leitet sich vom lateinischen Wort "nitidus" (glänzend) ab und bezieht sich auf die charakteristischen, glänzenden Tonhäutchen der Polyederaggregatoberflächen, die ein typisches Unterscheidungsmerkmal zu den Ferralsolen oder Luvisolen darstellen.

Das Gefüge der Nitsole ist locker bis plastisch-labil (Bearbeitung!).

Die Nitsole zählen zu den relativ ertragsfähigen Böden der Tropen und sind zum Beispiel in Afrika beste Standorte für Kakao, Banane und Kaffee (nach YOUNG, 1976 1 bis 2 Prozent der tropischen Böden).

Die Böden sind mittlerer Erosionsgefährdung ausgesetzt und erlauben bei Schonung und Pflege der organischen Substanz und möglichst dauernder Bodenbedeckung permanenten Ackerbau.

1) lessivierte Böden: Böden mit Tonverlagerung in den Unterboden (B-Horizont).

In Verbindung mit einer ausgeglichenen Düngewirtschaft sind aufgrund der guten physikalischen Eigenschaften auch hohe Erträge möglich. Das Ertragsrisiko ist relativ gering.

Acrisole (A)

Basenarme, alte und saure Tonböden mit geringer Basensättigung (weniger als 50 Prozent) und einem durch Lessivierung (Tonverlagerung) und Tonanreicherung deutlich ausgeprägten Tonanreicherungshorizont (B_t). Der Name leitet sich vom lateinischen "acris" (sauer) ab.

Die Böden sind aus basenarmen, quarzreichen Gesteinen (Granit, Sandstein) entstanden und sind typisch für die wechselfeuchten Tropen.

Acrisole sind chemisch verarmt, vor allem im Unterboden, wo auch Aluminium-, Eisen- und Mangantoxizität auftreten können.

Stickstoff und Spurenelemente sind oft im Mangel, die physikalischen Eigenschaften sind mittel bis schlecht.

Der dichte B-Horizont begrenzt oft die Durchwurzelbarkeit und Wasserführung; hydromorphe und lateritische Merkmale treten häufig auf.

Permanenter Ackerbau verlangt viel Geschick und muß vor allem auf den Erhalt oder die Mehrung der organischen Substanz abzielen, denn die Böden sind sehr erosionsgefährdet (durch Textur und Klima), haben einen unausgeglichenen Wasserhaushalt und neigen nach Humusschwund schnell zur Verschlammung und Verdichtung (ROOSE, 1981). Auch die Bodenbearbeitung muß darauf abgestimmt sein.

Wo Ackerbau betrieben wird ohne entsprechende Maßnahmen des Erosions- und Humusschutzes, sind die Acrisole häufig schon bis auf die B_t bzw. lateritischen Horizonte abgetragen worden (YOUNG, 1976).

Die Acrisole werden häufig für den Anbau genutzt, sie bringen aber nur geringe Erträge. Nach SANCHEZ (1976) und BURINGH (1979) sind Weide und Wald die beste Nutzung (im natürlichen Zustand: Andropogon-Gräser; Strauch-Savannen).

Vorsichtige Kalkung kann die Böden leicht verbessern, gelangt aber oft nicht in den limitierenden Unterboden. Wegen Mikronährstoffmangel ist zudem besondere Vorsicht geboten.

Luvisole (L)

Wie die Acrisole haben auch die Luvisole einen typischen Tonanreicherungshorizont ("argillic"), aber eine höhere Basensättigung (mehr als 50 Prozent) und sind deshalb für Ackerbau besser geeignet als Acrisole.¹⁾

Vertisolähnliche Eigenschaften oder "ferric properties" mit Eisenoxidkonkretionen sind verbreitet.

Es treten neben roten auch stark braune B-Horizonte auf ("chromic"), außerdem lateritische, hydromorphe und in semiariden Gebieten auch Kalkanreicherungshorizonte ("calcic").

Die Böden sind für Ackerbau geeignet (Gefahren siehe Acrisole). (Siehe hierzu ROOSE, 1981; LAL, 1976.)

Cambisole (B)

Verbraunte Böden; keine oder nur geringe Ferrallitisierung bzw. Lessivierung oder Podsolierung. Die Verwitterung ist noch schwach ausgeprägt, das heißt, es hat noch kaum eine Verlagerung von Verwitterungsprodukten stattgefunden.

Cambisole sind Böden mit braunerdeähnlichen Übergangseigenschaften.

Der angewitterte, strukturierte B-Horizont kann etwas tonreicher oder rötlich gefärbt sein. (Ein etwa ursprünglich vorhandener Carbonatgehalt ist meist weitgehend ausgewaschen.) Die Merkmale sind jedoch nicht stark genug ausgeprägt, um zum Beispiel von einem Eisenanreicherungshorizont ("oxic") etc. sprechen zu können.

Die Cambisole finden sich häufig in tropischen Berglagen. Der Anteil an verwitterbaren Mineralien ist größer als 3 Prozent, und die KAK liegt bei über 16 m.e. pro 100 Gramm Ton.

Die Cambisole haben meist recht gute ackerbauliche Eigenschaften, sind gut durchwurzelbar und neigen wenig zu Verdichtungen. Die Wasserkapazität und die Nährstoffeigenschaften hängen stark von der jeweiligen Textur und dem Ausgangsmaterial ab.

1) In der US-Soil Taxonomy wird die Grenze zwischen den entsprechenden Böden Ultisol (≅ Acrisol) und Alfisol (≅ Luvisol) bei 35 Prozent Basensättigung gezogen, und zwar ebenfalls mit der Absicht, die extrem entbasten Böden von den ansonsten ähnlichen übrigen zu trennen.

Einige wichtige Begriffe in der FAO-Nomenklatur

(alphabetisch geordnet)

zur Unterteilung der "major soil units" nach bestimmten Eigenschaften:

acric	extrem nährstoffarm
argillic	mit Tonanreicherungshorizont
chromic	Boden mit stark braunem oder rotbraunem B-Horizont
dystric	Basensättigung < 50 % (relativ nährstoffarm)
eutric	Basensättigung > 50 % (relativ nährstoffreich)
ferralic	Boden mit Ferralsoleigenschaften, geringe KAK (diagnostische Bodeneigenschaft), reich an Fe-, Al-Oxiden
ferric	Boden mit Eisenkonkretionen (ca. 2 cm Ø)
gleyic	Boden mit hydromorphen Eigenschaften in 0-50 cm Tiefe
haplic	Boden mit weniger stark entwickelten typischen Eigenschaften
humic	Boden mit "umbric" Horizont, d.h. Moderhumus; relativ humusreich
mollic	dunkler A-Horizont mit hoher Basensättigung
ochric	relativ schwach ausgebildeter A-Horizont ohne die Eigenschaften "mollic" und "umbric"
orthic	normale Bodenbildung; ohne sonstige Besonderheiten
oxic	oxidisch, vollständige Mineralverwitterung; porös, durchlässig (auf den B-Horizont bezogen)
plinthic	mit Plinthit in 0 bis 125 cm (aus Plinthit entsteht Laterit)
rhodic	leuchtend rot
vertic	Vertisoleigenschaften (quellend, schrumpfend)
xanthic	leuchtend gelb

In der Legende der FAO/UNESCO (1974) finden sich Tabellen zum Vergleich des FAO-Systems mit nationalen Systemen (s. 14-20) (siehe auch DUDAL, 1968; S. 11-18).

2.3.4.3. Klassifikation nach der US-Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1975)

Die Benennung der Böden nach der US-Soil Taxonomy, die eine echte Systematik darstellt, setzt sich fast nur aus lateinischen und griechischen Silben zusammen.

Wichtige Horizonteigenschaften und die Taxa jeder Ordnungsstufe sind quantitativ definiert, wobei in erster Linie chemische und morphologische Unterscheidungskriterien eingeführt wurden. BURINGH (1979) spricht deshalb von einer "morphologischen" Systematik.

Die Soil Taxonomy ist das umfassendste und logischste System, das augenblicklich zur weltweiten Klassifizierung der Böden existiert.

Sein großer Nachteil ist, daß viele Böden erst nach genauen Labortests klassifiziert werden können, was vom Aufwand, aber auch von der technischen Ausstattung her oftmals nicht möglich ist. Im Gelände können die Böden deshalb oft nur ganz grob angesprochen werden.

(Hat etwa ein lessivierter Savannenboden mehr als 35 Prozent Basensättigung, so kann es ein Alfisol sein; ist es weniger, so handelt es sich um einen Ultisol.)

Unterschiedliche Definitionskriterien und -schwellen haben auch zur Folge, daß ein Vergleich der Böden (etwa mit der FAO-Nomenklatur) oft nur in einer Richtung möglich ist und nicht umgekehrt.

So ist ein Gleysol der FAO nicht immer ein Aquept, denn es gibt viele Unterordnungen mit dem Wortelement "Aqu-", auf das sich die FAO-Bezeichnung "Gleysol" bezieht.

Die erste Ordnung der Soil Taxonomy ist die "Soil Order", die 10 Namen umfaßt, die auf "-sol" (Boden) enden (Wiedergabe in Anlehnung an BURINGH, 1979 und SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

- 1. Ent - isol (engl. recent = jung); unentwickelte junge Böden ohne erkennbare Horizonte (FAO: Regosols, Arenosols, Fluvisols)
- 2. Vert - isol (lat. vertere = umwenden); dichte, dunkle Böden aus quellfähigen Tonen (selbstmulchend) (FAO: Vertisols)
- 3. Inc-ept-isol (lat. inceptum = Anfang); schwach entwickelte Böden mit bereits entwickeltem B-Horizont unterhalb der Definitionsschwelle (z.B. cambic) (FAO: Cambisols, Fluvisols)
- 4. Ar-id-isol (lat. aridus = trocken); Böden mit Merkmalen trockenen Klimas. Arides Feuchteregime, calcimorph, humusarm (FAO: Yermosols, Xerosols)

- 5. M-oll-isol (lat. mollis = weich); Böden mit mächtigem, dunklem und humusreichem (Mull) A-Horizont (FAO: Chernozems, Kastanozems)
- 6. Sp-od-osol (gr. spodos = Holzasche); Böden mit podsoliertem (fahlem) B-Horizont (FAO: Podzols)
- 7. Alf-isol (von Pedalfer = alter Name für Böden mit völliger Carbonatauswaschung) Böden mit Tonanreicherungshorizont, aber noch mäßiger Basenauswaschung (V > 35 %) (FAO: Luvisols, Nitosols, Acrisols mit V > 35 %)
- 8. Ult - isol (lat. ultimus = der Letzte); tropische Böden mit Tonanreicherungshorizont, starker Silikatverwitterung und niedriger Basensättigung (V < 35 %) (FAO: Acrisols, und teilweise Nitosols und Luvisols)
- 9. Ox - isol (von oxid); sesquioxidreicher, stark verwitterter, ausgewaschener Boden (der inneren Tropen) (FAO: Ferralsols)
- 10. H-ist-osol (gr. histos = Gewebe); Moore und andere organische Böden mit mächtiger Humusaufgabe (FAO: Histosols)

In der ersten Kategorie haben die Böden noch eine hohe Entsprechung zur FAO-Nomenklatur (siehe Angaben, die in Klammern angehängt sind), so daß man die Namen auch von rechts nach links vergleichen kann, was nachher nicht mehr möglich ist.

Einige Böden der FAO-Nomenklatur werden erst von der zweiten Kategorie des US-Systems erfaßt, so etwa die "Gleysols" durch die Vorsilbe "Aqu-". Die unterstrichenen Buchstaben dienen nun dazu, die Namen der Unterordnungen zu bilden, wozu nun die Buchstabenkomplexe der Unterordnungen vorangestellt werden.

Beispiel: 1. Ordnung Ultisol, Unterordnung Aquic; der Boden erhält den Namen Aqu-ult = Aquult.

Die wichtigsten Kategorien zur Bildung tropischer Unterordnungen:

- Alb - mit einem gebleichten ("albic") Eluvialhorizont (lat. albus = weiß)
- And - Boden vulkanischer Asche (jap. ando = dunkler Boden) entspricht Andosols (FAO)
- Arg - Vorhandensein eines Tonanreicherungshorizonts (argillic horizon) (lat. argilla = Ton)
- Ferr - eisenreich (lat. ferrum = Eisen)
- Fluv - Schwemmlandböden (lat. fluvius = Fluß), entspricht Fluvisols (FAO)
- Hum - humusreich

- Ochr - mit einem hellen A_h (gr. ochros = fahl)
- Orth - normale Bildung (gr. orthos = echt)
- Psamm- sandreich, mit sandiger Textur (gr. psammos = Sand) entspricht Arenosols und einigen Regosols (FAO)
- Trop- ständig warm, humid (engl. tropic = tropisch)

Sehr wichtig sind in der US-Nomenklatur auch die Angaben zum Feuchte-regime des Bodens:

- Aqu - Aquic, das heißt Böden mit Hydromorphiemerkmalen (lat. aqua = Wasser); bei diesen Böden ist der Unterboden fast immer feucht oder wassergesättigt; entspricht Gleysols und Gleyic Soils (FAO)
- Ud - Udic, das heißt die Böden sind meist feucht. Sie können für weniger als 90 Tage trocken sein (d.h. pF < 4,2 $\hat{=}$ 15 bar (lat. udus = humid))
- Ust - Ustic, d.h. die Böden sind über ein halbes Jahr feucht und bis zu 90 Tagen am Stück oder insgesamt 180 Tage trocken (lat. ustus = verbrannt)
- Xer - Xeric, d.h. mit semiaridem Klima (gr. xeros = trocken)
- Torr - Torric, d.h. grundsätzlich trocken (gr. torridus = trocken), Wüstenklima

Eine weitere Unterteilung der Unterordnungen führt zu den "Great Soil Groups", die annähernd den Bodentypen Deutschlands entsprechen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1982).

Sie werden durch Anfügen weiterer Buchstabenkomplexe (mehr als 50) vor den zusammengesetzten Namen der Unterordnung gebildet.

- Beispiele: Acr - für Böden mit extremer Verwitterung
- Ein "Acr-orth-ox" ist ein extrem verwitterter, saurer, echter Oxisol (entspricht Acric Ferralsol der FAO-Nomenklatur).
- Palae - für Böden mit extrem fortgeschrittener Entwicklung
- Ein "Palae-ust-ult" ist ein Ultisol mit extremer Entwicklung bei sommertrockenem Feuchte-regime.

Die nächsten Kategorien (Untergruppen und Familien) werden durch adjektivische Beifügungen gebildet.

Beispiel: Rhodic Palaeustult - wie oben, nur ungewöhnlich stark rot gefärbt (Eisenoxide, Hämatit).

2.3.4.4. Die Klassifikation nach dem französischen System = ORSTOM-System (in Anlehnung an AUBERT, 1964 und YOUNG, 1976)

Das französische System oder System ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-mer) wird in allen Ländern des ehemaligen Französisch-Afrikas benutzt.

Es ist ein natürliches Klassifizierungssystem, das Klima und Bodengenetik (Grad der Entwicklung) sehr stark berücksichtigt und die Böden vor allem nach morphologischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Profile einteilt.

Die Klassifikation ist hierarchisch mit 10 Klassen, die in Unterklassen, Gruppen und Untergruppen unterteilt sind.

Klassen

- I Sols minéraux bruts (Rohböden)
- II Sols peu évolués (schwach entwickelte Böden)
- III Sols calcomagnésimorphes (calcimorphe Böden)
- IV Vertisols et Paravertisols (Vertisole und vertisolähnliche Böden)
- V Sols isohumiques
- VI Sols à mull (Mullhumusböden)
- VII Podzols et sols podzoliques (podsolierte Böden)
- VIII Sols à sesquioxydes et à matière organique rapidement minéralisée (mediterrane und tropische Verwitterungsböden)
- IX Sols halomorphes (Salzböden)
- X Sols hydromorphes (hydromorphe Böden)

In Klasse VIII, die die sesquioxidreichen Böden mit mullähnlicher, schnell mineralisierender organischer Masse umfaßt, sind die meisten der typischen tropischen und mediterranen Böden enthalten.

Die Klasse wird in 3 Unterklassen aufgeteilt:

1. **Sols rouges et bruns Méditerranéens ou subtropicaux**
(Rote und braune mediterrane und subtropische Böden)
Sie sind durch relativ hohe Eisenoxidgehalte und silikatreiche Verbindungen gekennzeichnet und werden nach Farbe, Tonverlagerung, Grad der "Versteppung", Verkrustung usw. in weitere Gruppen und Untergruppen aufgeteilt.

2. **Sols ferrugineux tropicaux ou fersiallitiques** (Böden mit Eisenoxiden oder fersiallitische Böden)

Es sind Böden mit hohen Gehalten an freiem Eisen, nicht aber an freiem Aluminium. Die Basensättigung des B-Horizontes ist noch größer als 40 %. Je nach der Stabilität oder Verlagerung der Tonteilchen, die sie enthalten, werden sie in 2 Gruppen unterteilt:

- a) **Sols ferrugineux non lessivés** (ohne Tonverlagerung)
- b) **Sols ferrugineux lessivés** (lessiviert mit Tonverlagerung)

Je nachdem ob der obere Horizont gegenüber dem unteren an Eisen-Sesquioxiden verarmt ist oder nicht, werden die "sols ferrugineux non lessivés" noch einmal in 2 Untergruppen aufgeteilt.

Die "sols ferrugineux lessivés" werden in 4 Untergruppen aufgeteilt: solche mit Konkretionen, solche ohne Konkretionen, Böden mit Verhärtungen und Böden mit Pseudovergleyung (zeitweise staunab).

3. **Sols ferrallitiques** (ferrallitische Böden)

Böden mit freiem Eisen und Aluminium; Sesquioxide des Eisens und in mehr oder weniger großem Umfang auch von Aluminium.

Diese Unterklasse wird in 4 Gruppen aufgeteilt:

- a) **Sols faiblement ferrallitiques** (mäßig ferrallitische Böden):

Bei diesen ist die Zersetzung und Verwitterung der Minerale noch nicht zum Extrem fortgeschritten; das Verhältnis von $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ der kolloidalen Teilchen ist noch ≥ 2 und der Gehalt an verwitterbarem Material kann noch recht beachtlich sein. Sie können mehr oder minder stark entbast sein ("désaturé") bzw. zum Teil noch beachtliche, verwitterbare Schluffanteile oder Polyederstruktur besitzen ("ferrisolique"). Ausprägungen mit hydromorphen Merkmalen oder mit Verhärtungen werden ebenfalls als Untergruppen unterschieden.

- b) **Sols ferrallitiques typiques ou fortement ferrallitiques** (typisch ferrallitische Böden):

Sie zeigen die typischen Merkmale der Unterklasse, sind fast völlig verwittert, ausgewaschen, nährstoffarm, reich an freiem Eisen und Aluminium und haben ein $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis von kleiner 2. Nach der Färbung ihrer A- und B-Horizonte werden sie in rote, gelbe, beige und solche mit gelbem über rotem Horizont eingeteilt. Außerdem wird noch die Untergruppe mit Verhärtungen und Verkrustungen unterschieden.

- c) **Sols ferrallitiques lessivés** (lessivierte, ferrallitische Böden):

Bei diesen können entweder nur die Basen in der oberen Hälfte des Profils stark ausgewaschen sein, während die sonstigen kolloidalen Teilchen noch relativ konstant im ganzen Profil auftreten, oder - das Profil zeigt zugleich Verlagerung von Sesquioxiden, Ton und Basen, oder - sie können starke Akkumulationen im Unterboden aufweisen und verhärtet sein (Laterit).

Entsprechend werden sie in diese 3 Untergruppen aufgeteilt.

- d) **Sols ferrallitiques humifères** (humusreiche, ferrallitische Böden):

In dieser Gruppe sind die ferrallitischen Böden mit mindestens 6 % organischer Masse in den oberen 20 cm Boden zusammengefaßt. Die Böden werden unterteilt in die schwarzen, braunen und braunroten Untergruppen. Außerdem werden noch die sehr sauren Rohhumusböden und die humosen Ferrallite der Höhenlagen unterschieden.

2.3.4.5. Vergleichende Darstellung einiger wichtiger Bodentypen nach den verschiedenen Systemen

Tab. 2.3.10.: Ungefähre Entsprechungen einiger wichtiger Böden der Tropen nach dem FAO-System bei der neuen US-Taxonomie und dem französischen Klassifizierungssystem (aus AUBERT und TAVERNIER, 1972)

FAO ^a	Neue U.S. Soil Taxonomy	Französische Klassifikation
FLUVISOLS	Fluents	Sols minéraux bruts et sols peu évolués d'apport alluvial et colluvial
REGOSOLS	Psamments Orthents	Sols minéraux bruts et sols peu évolués d'apport éolien
ARENOSOLS Ferralic A.	Oxic Quartzipsamments	Sols ferrallitiques moyennement ou fortement désaturés (à texture sableuse)
GLEYSOLS Eutric G. Dystric G. Humic G. Plinthic G.	Tropaquepts Humaquepts Plinthaquepts	Sols hydromorphes peu humifères à gley Sols humiques à gley Sols hydromorphes à accumulation de fer en carapace ou cuirasse
ANDOSOLS	Andepts	Andosols
PLANOSOLS Eutric P. Dystric P.	Paleudalfs Paleustalfs	Sols ferrugineux tropicaux lessivés (pro parte)
CAMBISOLS Dystric C.	Dystropepts	Sols ferrallitiques fortement et moyennement désaturés, rajeunis (pro parte)
Eutric C.	Eutropepts	Sols ferrugineux tropicaux (non lessivés); Sols ferrallitiques faiblement désaturés, rajeunis
Humic C.	Humitropepts	Sols ferrallitiques fortement et moyennement désaturés, humifères, rajeunis
LUVISOLS	Tropudalfs Paleudalfs Paleustalfs	Sols ferrugineux tropicaux lessivés
ACRISOLS		Sols ferrallitiques fortement désaturés
Rhodic A.	Rhodudults	Sols ferrallitiques désaturés lessivés

Fortsetzung Tab. 2.3.10.:

FAO ^a	Neue U.S. Soil Taxonomy	Französische Klassifikation
	Rhodustults	Sols ferrallitiquement désaturés lessivés
FERRASOLS	Oxisols	Sols ferrallitiques
LITHOSOLS	Lithic subgroups	Lithosols et Sols lithiques

a) nach dem FAO World Soil Resources Report Nr. 33 (1968), Revision Sept. 1970

Es ist nicht möglich, im Rahmen dieses Überblicks auf alle Böden einzugehen; es wurde aber versucht, einen Einblick in die neuere Nomenklatur tropischer Böden zu geben, damit derjenige, der Versuche anstellt oder Ergebnisse, die anderswo erzielt wurden, übertragen möchte, wenigstens einen groben Anhaltspunkt hat.

Das Kapitel soll ferner eine Anregung dazu sein, sich stärker mit den Böden zu beschäftigen, die für die Landwirtschaft allgemein und insbesondere für eine "standortgerechte" Landwirtschaft (mit möglichst wenig externen Inputs) einen der wichtigsten Standortfaktoren darstellen.

Nur unter Beachtung der Böden und der Kenntnis ihrer wichtigsten fruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften (bzw. des Fehlens bestimmter Eigenschaften) ist es möglich, geeignete, standortgerechte Nutzungssysteme zu entwickeln.

Aus der Kenntnis der Bodenfeuchteverhältnisse, des Anteils an verwitterbaren Mineralen, der Dynamik des Humushaushaltes, der Austauschkapazität, der Tonminerale und der Bodenstruktur (um nur die wichtigsten Bodeneigenschaften zu nennen), lassen sich wichtige Erkenntnisse für die Wahl der Nutzpflanzen, die Bodenbearbeitung, die Düngungsart und die erforderlichen technischen Begleitmaßnahmen gewinnen.

Die Bodenverhältnisse, zusammen mit den bereits kurz abgehandelten klimatischen und vegetationskundlichen Bedingungen, liefern den naturgegebenen Rahmen und die Ressourcenbasis für eine ökologisch-standortorientierte Landwirtschaft, die es dann, je nach den soziokulturellen und ökonomischen Rahmenbedingungen, zu gestalten gilt.

Der Erfolg und die Notwendigkeit oder Eignung bestimmter Maßnahmen zum Erhalt und zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit, die in den weiteren Abschnitten des Buches behandelt werden, hängt vor allem auch von den na-