

Die Herausgeber und Autoren widmen dieses Heft CARL TROLL, dem Begründer der ERDKUNDE, zum Gedenken an seinen 80. Geburtstag am 24. Dezember 1979

## DER JAHRESGANG DER TROCKENGRENZE IN AFRIKA

Mit 5 Abbildungen und 1 Karte (Beilage VIII)

WILHELM LAUER und PETER FRANKENBERG

*Summary:* The seasonal shifting of 'arid land boundaries' in Africa

Geographical analysis concerning 'arid land boundaries' began in 1910 with the studies of A. PENCK.

The seasonal variation of arid or humid conditions in Africa had been elaborated since then by means of different methods (fig. 1-3), taking absolute or relative precipitation figures as indices of aridity or taking more complex aridity formulae. The following concept of drawing monthly 'arid land boundaries' is based on the calculation of monthly waterbalances (P-E). Three concepts of 'arid land boundaries' are discussed (cf. W. LAUER, P. FRANKENBERG, 1978). The definition of a 'climatic-ecological arid land boundaries' is based on the concept of 'potential evapotranspiration' (ETP) according to C. W. THORNTWHAITE (1948). Potential evapotranspiration is calculated as to the formula of J. PAPADAKIS (1966). A month is regarded as humid if precipitation equals or exceeds evapotranspiration (ETP), it is regarded as arid if precipitation is below 'potential evapotranspiration'. Thus 'arid land boundaries' are drawn for each different month. They are all shown together in one map (map 1), thus integrating 12 'arid land boundaries'. The map shows how many months and which period of the year can be defined as humid in Africa. The annual variation of monthly 'arid land boundaries' shows quite strong correlations with the shifting of inter-tropical 'convergence zones' (fig. 5) and 'subtropical high pressure cells'. The main changes in the overall pattern of monthly 'arid land boundaries' take place during may/june and oct./nov. when the 'subtropical high pressure cells' shift abruptly to the north or to the south.

### Problemstellung

Die Frage der Wasserversorgung wird für die sich in der „Dritten Welt“ besonders rasch vermehrende Bevölkerung immer drängender. Hier können Studien zur regionalen Wasserbilanz dazu beitragen, die verfügbaren Wasserreserven in ihrer räumlichen Verteilung realistisch abzuschätzen.

Seit langem wird versucht, gerade für Afrika die Frage der Humidität und Aridität in ihrem Raummuster zu klären, nicht zuletzt deswegen, weil dieser Kontinent eine relativ klare naturräumliche Gliederung aufweist. A. PENCK hatte bereits 1910 die Frage der Trockengrenze, welche Räume positiver und defizitärer

Wasserbilanz trennt, umfassend diskutiert. F. JAEGER konnte 1928 diese Grenze räumlich nach den Kriterien des Verhaltens von Flüssen (Abfluß) für ganz Afrika und 1936 für Landschaften Nordafrikas im Detail in Karten festhalten. I. HENNING und D. HENNING haben 1976 erneut für Afrika eine „klimatologische Trockengrenze“ berechnet, wobei sie zur Bestimmung der Wasserbilanz das Jahresmittel des Niederschlags der ‚potentiellen Evapotranspiration‘, auf der Basis von PENMAN, gegenüberstellten. W. LAUER hatte jedoch bereits 1952 deutlich machen können, daß eine zeitlich abgestufte Differenzierung der Humidität bzw. Aridität im Raum erst ökologisch relevante Aussagen gestattet. Seine Isohygromenenkarte (1951, 1952) hatte charakteristische Übereinstimmungen zwischen der räumlichen Verteilung der Vegetation und der Zahl der humiden (bzw. ariden) Monate aufzeigen können. Hierzu war nicht nur die Definition der Trockengrenze im Jahresmittel, sondern vor allem die Bestimmung feuchter und trockener Monate die wesentliche Grundlage. Da sich in Afrika mit der Verlagerung der Klimazonen – im wesentlichen gesteuert durch die „Wanderung“ der Polarfronten und der ITC – eine räumliche Verlagerung der Humidität im Jahresablauf vollzieht, ist eine mittlere jährliche Trockengrenze ökologisch weniger aussagekräftig. Sie wird im Jahresablauf der Humidität in ihrer räumlichen Lage nur zweimal, besonders in den Übergangsjahreszeiten erreicht. Im folgenden soll daher versucht werden, den Jahresgang der mittleren monatlichen Trockengrenzen im Raume Afrikas aufzuzeigen. Für jeden einzelnen Monat wird eine Trockengrenze gezeichnet und der humide Raum abgegrenzt. Das integrierte Gesamtbild zeigt dann gleichsam die Wanderung der Trockengrenzen im Jahresablauf.

### Forschungsstand

Mit der saisonalen Verteilung der Niederschläge in Afrika hatte sich H. SCHMIDT schon 1926 ausführlich beschäftigt. Er legte eine Studie vor, in der er unter anderem „Regenjahreszeiten“ herausarbeitete. Seine Karte (Abb. 1) weist für Afrika die Räume mit über-

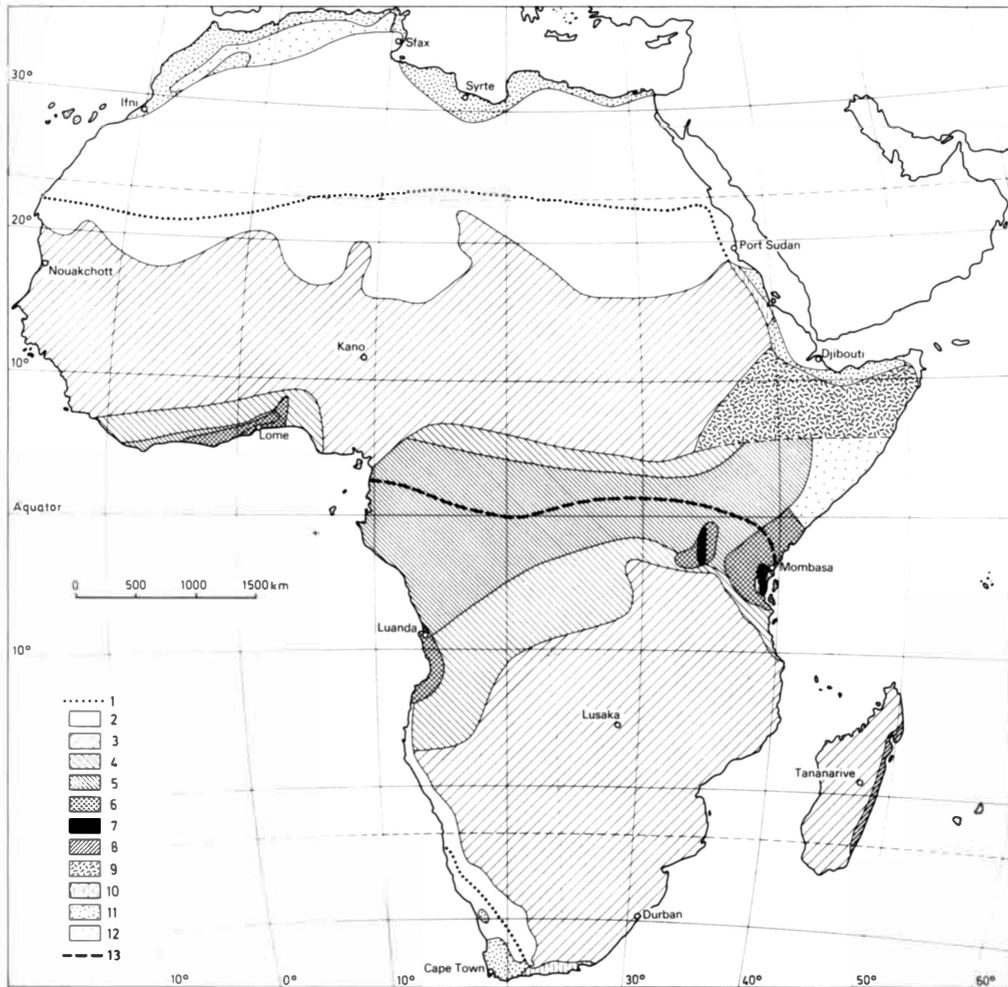


Abb. 1: Die Regenzeiten Afrikas (SCHMIDT, 1926)

The rainy seasons of Africa (SCHMIDT, 1926)

1 Sommer-/Winterregenzeit; 2 dauernd regenarm bzw. regenlos; 3 einheitliche Regenzeit mit Maximum im Hochsommer; 4 doppelte Regenzeit mit Maximum im Frühjahr und Herbst und nur schwach ausgeprägter ‚kleiner Trockenzeit‘; 5 doppelte Regenzeit mit Maxima im Frühjahr und Herbst, die Regenzeitmaxima liegen mehr als drei Monate auseinander; 6 doppelte Regenzeit, beide Trockenzeiten sind absolut trocken; 7 Vorkommen einer dritten kleinen Regenzeit in den Monaten Juni oder Juli; 8 doppelte Regenzeit mit Maxima im Spätsommer oder Winter; 9 doppelte Regenzeit mit Maxima im Frühjahr und Sommer oder Frühjahr und Winter; 10 schwache Niederschläge zu allen Jahreszeiten (Maxima Frühjahr und Herbst); 11 Winterregen; 12 vorwiegend Frühjahrsregen; 13 Regenäquator

wiegenden Winter- bzw. überwiegenden Sommerregen aus. Dabei tritt insbesondere das Phänomen der „Kleinen Trockenzeit“ hervor, das heißt, die Unterbrechung der sommerlichen Regenzeit im tropischen Afrika. Seine Regen- und Trockenzeiten sind relativ definiert. Er kennzeichnet Monate, in denen mehr als 1/12 der Jahresniederschlagsmenge fallen, als feucht und Monate, in denen weniger als 1/12 der Jahresniederschlagsmenge fallen, als trocken. Er bezeichnet dies als den ‚relativen Exzess des Niederschlags‘ (écart pluviométrique relatif; ANGOT, 1893).

W. LAUER (1952) definiert bei seiner Darstellung der ‚ombrothermischen Klimate‘ (vgl. Abb. 2) die humide

und aride Zeit absolut. Wegen der ökologischen Relevanz humider und arider Zeitabschnitte des Jahres wurden die humiden und ariden Monate so festgelegt, daß der Index 20 nach der DE MARTONNE'schen Formel, für Monate berechnet, die absolute Grenze zwischen humid und arid darstellt

$$\left[ i = \frac{12 N}{t + 10} \right].$$

Die sich ergebenden 10 ombrothermischen Klimateypen charakterisieren daher den realen ökoklimatischen Zustand der Landschaftsräume besser als relativ definierte Regenzeiten (vgl. Abb. 2).

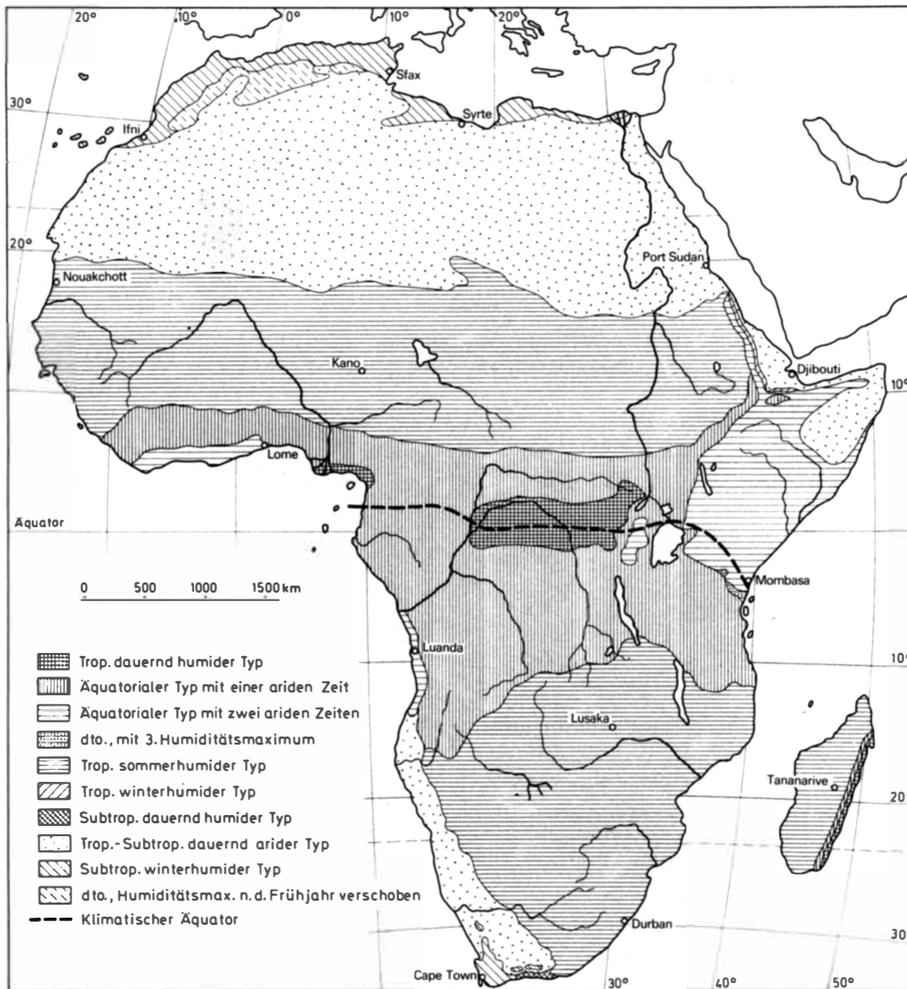


Abb. 2: Typen der ombrothermischen Klimate in Afrika (LAUER, 1951, 1952)  
Types of ombrothermal climates in Africa (LAUER, 1951, 1952)

Selbstverständlich gibt es einfachere absolute Definitionen von Regen- und Trockenzeiten. Für die Tropen Afrikas hatte man meist einen Regenschwellenwert von 50 mm als ökologisch beziehungsreich angesehen (vgl. H. SCHMIDT, 1926). H. LAUTENSACH (1951) (vgl. auch LAUTENSACH/MAYER, 1960) hatte für Spanien 30 mm als Schwellenwert für einen Trockenmonat gesetzt, da dort bei kühleren klimatischen Bedingungen weniger Wasser verdunstet. Später bezeichnet B. N. BOWDEN (1964) für die Tropen Afrikas Monate mit weniger als 25 mm Niederschlag als trocken und Monate mit einem höheren Niederschlagsaufkommen als feucht. Dieser Schwellenwert ist ökologisch allerdings kaum vertretbar, da er bereits einen ausgesprochenen Dürremonat (vollarid), nicht aber einen trockenen Monat (semiarid) ausdrückt. B. N. BOWDEN benutzt diesen Schwellenwert aber, um den Beginn und das Ende der Trockenzeit im tropischen Afrika kartographisch festzuhalten (vgl. Abb. 3).

Die Ansätze von H. SCHMIDT (1926) und B. N. BOWDEN (1964) zur hygrisch-chorologischen Differenzierung Afrikas fußen lediglich auf dem Niederschlagsaufkommen und berücksichtigen nicht das Negativglied der Wasserbilanz, nämlich die Verdunstung. W. LAUER (1951, 1952) versuchte, beide Glieder des Wasserhaushaltes in der damals häufig verwandten Ariditätsformel nach DE MARTONNE, auf Monatsbasis umgestellt, zu fassen, wobei die Verdunstung nur durch die Lufttemperatur ausgedrückt wird und somit physikalisch nicht exakt repräsentiert ist. Der Trockengrenzwert ist rein empirisch gewonnen.

Mit einer erweiterten Datenbasis und einfachen, aber verlässlichen Verdunstungsformel ist es heute möglich, zur hygrisch-chorologischen Differenzierung Afrikas für jeden Monat die Wasserbilanz zu ermitteln, also die Differenz von Niederschlag (N) und Verdunstung (V) und so einen Monat mit Wasserüberschuß als humid und mit Wasserdefizit als arid zu

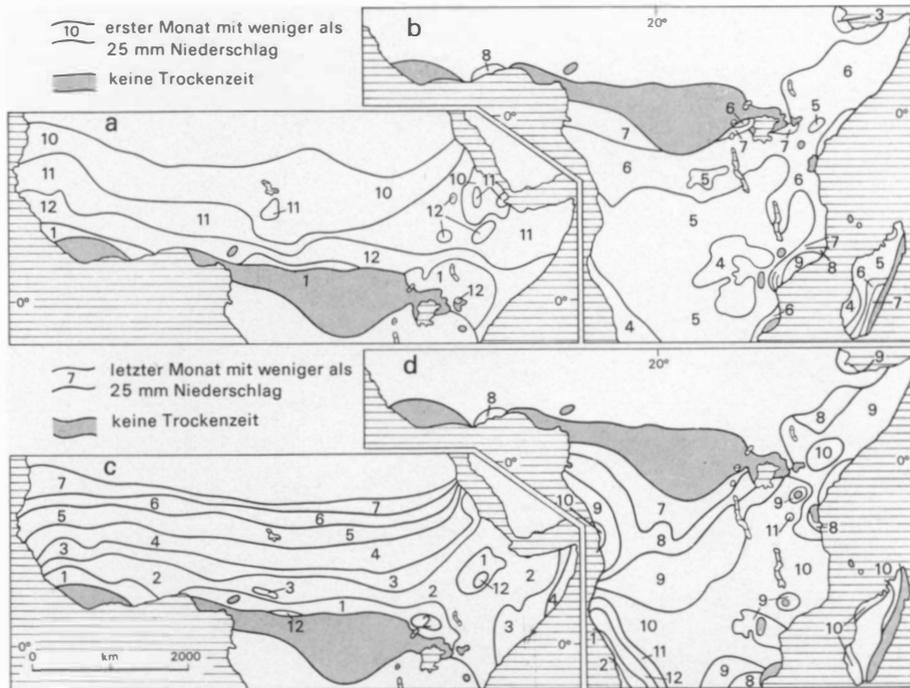


Abb. 3: Trockenzeit im innertropischen Afrika (BOWDEN, 1964)

a Beginn der nordhemisphärischen Trockenzeit; b Beginn der südhemisphärischen Trockenzeit; c Ende der nordhemisphärischen Trockenzeit; d Ende der südhemisphärischen Trockenzeit

The beginning and the end of the dry seasons in intertropical Africa (BOWDEN, 1964)

a The beginning of the northern dry season; b the beginning of the southern dry season; c the end of the northern dry season; d the end of the southern dry season

bezeichnen. Es wird so eine objektivierte und physikalisch exakte Charakterisierung humider und arider Monate erreicht.

#### Methode

Eine Isohygromenenkarte sagt, wie hinreichend bekannt, nichts darüber aus, welche Monate arid bzw. humid sind. Die hier vorgelegte Karte der monatlichen Trockengrenzen (Beilage VIII) integriert die Dauer der humiden (ariden) Klimazustände, ausgedrückt in Monaten, mit der jahreszeitlichen Verteilung unter Nennung der Monate, die entweder humid oder arid sind. Da für jeden Monat eine Trockengrenze ermittelt wurde, enthält die Karte 12 Trockengrenzen mit den entsprechenden Monatsbezeichnungen. Das Kartenbild zeigt somit einen „Jahresgang“ der Trockengrenzen und damit die „Wanderung“ der humiden bzw. ariden Räume im Jahresverlauf. Abzulesen ist auch, welche und wieviele Monate des Jahres in einem bestimmten Raum humid sind. Dies ist in der Karte durch farbige Ziffern ausgewiesen, wobei die Ziffern 1–12 für Januar bis Dezember stehen.

Der Ausgangspunkt für die Bestimmung der Trockengrenzen ist die Wasserbilanzgleichung, also die Beziehung  $N=V$  nach A. PENCK (1910). Die monatliche

Trockengrenze scheidet für jeden einzelnen Monat Raumeinheiten mit Wasserüberschuß von solchen mit Wasserdefizit ( $N>V$ ;  $N<V$ ).

Drei verschiedene Typen von Trockengrenzen können nach W. LAUER/P. FRANKENBERG (1978 und 1979) über die Wasserbilanz ermittelt werden. Die Bilanzierung von Niederschlag und ‚Verdunstung freier Wasserflächen‘ ( $E_0$ ) führt zu einer ‚klimatischen Trockengrenze‘ ( $N-E_0=0$ ). In sie geht die Beschaffenheit der Erdoberfläche in keiner Weise direkt ein.

Seit C. W. THORNTHWAITE (1948) verwendet man bei der Bestimmung von Wasserbilanzen in der Regel die ‚potentielle Evapotranspiration‘ ( $pET$ ) als Negativglied. Auch die PENMAN-Formel wird meist in ihrer späteren Form verwendet (vgl. H. L. PENMAN, 1963), also im Sinne der ‚potentiellen Evapotranspiration‘. Sie drückt die Verdunstung des Systems Boden/Pflanze bei stets gleich dichter Vegetation und ebener Fläche aus. Eine Trockengrenze, ermittelt über die Bilanz von Niederschlag minus ‚potentieller Evapotranspiration‘ kann man als ‚klimaökologische Trockengrenze‘ bezeichnen ( $N-pET=0$ ).

Eine dritte Möglichkeit, die Verdunstung als output-Größe der Wasserbilanz auszudrücken, haben W. LAUER/P. FRANKENBERG erstmals 1978 vorgestellt,

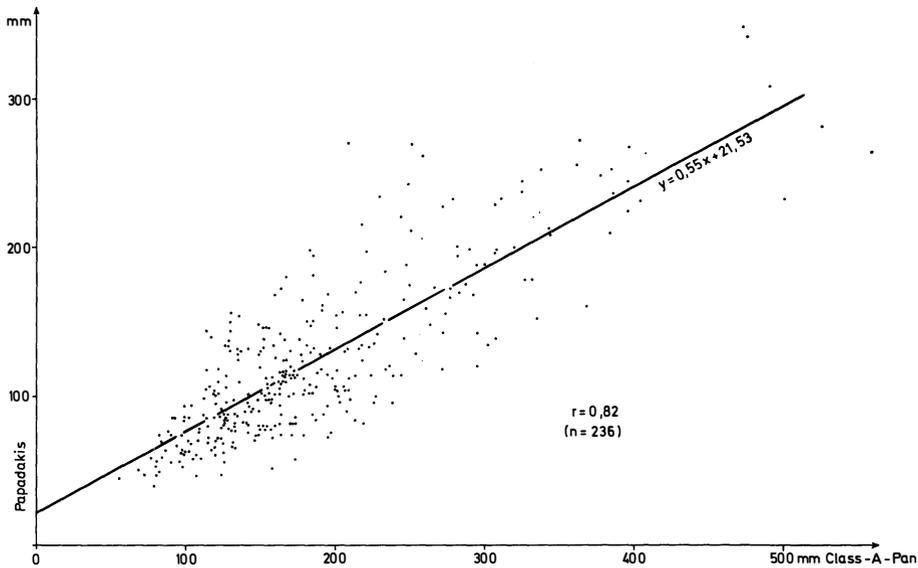


Abb. 4: Regressionsdiagramm der Beziehung von PAPADAKIS-Verdunstungswerten zu Class-A-Pan-Verdunstungswerten  
 Regressions-diagram of values of potential evapotranspiration, calculated according to PAPADAKIS, and values of evaporation measured by class-A-pan- evaporimeter

nämlich das Konzept der ‚potentiellen Landschaftsverdunstung‘ (pLV), welches das Verdunstungsverhalten der gegebenen Vegetations- und Bodenverhältnisse in das Konzept einer potentiellen Evapotranspiration einbringt. Die aus  $N-pLV=0$  resultierende Trockengrenze wird als ‚landschaftsökologische Trockengrenze‘ bezeichnet (in W. LAUER/P. FRANKENBERG, 1978, wurde sie ‚pflanzenökologische Trockengrenze‘ genannt).

Allen drei Trockengrenzen eignen nach Ansicht der Verfasser wichtige, aber verschiedene geographische Aussagemöglichkeiten. Will man z. B. die realen hygrischen Bedingungen der Vegetation in einem bestimmten Raum ermitteln, so genügt dazu weder das ‚klimatische‘ noch das ‚klimaökologische‘ Konzept. Der Wasserhaushalt in einem Raum wird nämlich entscheidend von der Vegetation selbst gesteuert, etwa von ihrer Dichte und ihrem ökophysiologischen Reaktionstypus. Es muß also bei der ökologischen Zusammenschau von Vegetationstypus und hygrischen Bedingungen die Vegetation selbst, etwa in ihrem Transpirationsverhalten, bei der Berechnung der Verdunstung berücksichtigt werden, um der wirklichen Wasserbilanz des entsprechenden Raumes nahezukommen und damit zu ermitteln, wieviel Wasser der Vegetation tatsächlich zur Verfügung steht. Dies kann das Konzept der ‚potentiellen Landschaftsverdunstung‘ unter Verwendung der ‚landschaftsökologischen Trockengrenzen‘ ermöglichen. Boden, Vegetation und Klima funktionieren kausalökologisch im Sinne eines Regelkreises und müssen auch bei der Bestimmung von Wasserbilanzen, humiden Zeiträumen etc. als ein solcher auf-

gefaßt werden, wenn die wirklichen Standortbedingungen der Vegetation erkannt werden wollen.

Will man das hygrische Raummuster mit der Vegetation in einen chorologisch-kausalen Zusammenhang bringen, so sollte bei der Bestimmung des Wasserhaushaltes zunächst einmal das spezielle Verdunstungsverhalten der Vegetation außer acht gelassen werden, weil sonst die Gefahr eines methodischen Zirkelschlusses besteht. Für die Analyse räumlicher Zusammenhänge von Vegetation und hygrischem Klima muß man daher die ‚klimatische‘ oder die ‚klimaökologische Trockengrenze‘ bzw. adäquate Isohygromenen heranziehen. Für den Entwurf der Karte (Beilage VIII) wurde so zur Berechnung der Trockengrenzen im klimaökologischen Sinne die ‚potentielle Evapotranspiration‘ (pET) verwandt.

Die den Berechnungen der monatlichen Wasserbilanzen (N-pET) zugrundeliegenden Niederschlagswerte wurden A. N. LEBEDEV (1970) entnommen. Die ‚potentielle Evapotranspiration‘ – also das Negativglied der Wasserbilanz – ist nach der Formel von J. PAPADAKIS (1966) berechnet worden:  $E = 0,5625 (e_{ma} - e_{mi} - 2)$ , wobei E die monatliche potentielle Evapotranspiration,  $e_{ma}$  das Dampfdruckdefizit bei der mittleren täglichen Maximum- und  $e_{mi}$  das Dampfdruckdefizit bei der mittleren täglichen Minimumtemperatur bedeuten. Daß es gerechtfertigt erscheint, pET nach J. PAPADAKIS (1966) heranzuziehen, wurde durch die sehr enge korrelative Beziehung zwischen PAPADAKIS-Werten und gemessenen Verdunstungswerten (Class-a-pan) gestützt (vgl. Abb. 4). Zudem ist die PAPADAKIS-Formel auch physikalisch hinreichend begründet, drückt sie doch den DALTON-

schen Ansatz aus, wonach das Dampfdruckgefälle die Verdunstungsvorgänge entscheidend steuert. Ihr mangelt es allerdings an einer direkten Berücksichtigung des Strahlungsterms, was bei der Mehrzahl der Klimastationen nicht ins Gewicht fällt, da Sättigungsdefizit und Strahlung in der Regel eng miteinander korrelieren. Eine physikalisch vollständigeren Verdunstungsformel haben W. LAUER/P. FRANKENBERG 1979 auf dem Geographentag in Göttingen vorgestellt. Mangels verlässlicher Messungen von Monatswerten der relativen Feuchte an ca. 20% der Klimastationen Afrikas, welche dieser Untersuchung zugrunde liegen, ist bei der vorliegenden Analyse der monatlichen Trockengrenzen die Verdunstung nach J. PAPADAKIS (1966) und nicht nach W. LAUER/P. FRANKENBERG (1979) berechnet worden, um möglichst viele Klimastationen auswerten zu können. Dies war um so eher möglich, da ja der Trockengrenzwert ermittelt werden sollte und dabei relevante Abweichungen nicht vorkommen, je nachdem die Verdunstung über J. PAPADAKIS (1966), H. L. PENMAN (1963) oder W. LAUER/P. FRANKENBERG (1979) berechnet wird. Dies belegen ausführliche Vergleichsberechnungen. Vom theoretischen Verdunstungsansatz her, um den es hier nicht geht, wäre allerdings den Gleichungen nach H. L. PENMAN und W. LAUER/P. FRANKENBERG der Vorzug zu geben.

#### *Das Raummuster des Jahresganges der Trockengrenzen*

In der Karte (Beilage VIII) sind die Trockengrenzen der einzelnen Monate des Jahres dargestellt und zugleich die Monate, die sich im langjährigen Mittel als humid herausgestellt haben, als Ziffern eingetragen.

Die Berechnung der monatlichen Wasserbilanz wurde für weit über 600 Klimastationen Afrikas vorgenommen, so daß das resultierende Raummuster der Trockengrenzen gut fundiert ist.

In N o r d a f r i k a tritt an der Küste des Maghreb zunächst die Trockengrenze 10 (Oktober) auf. Der Oktober erscheint somit als humider Monat. Nach Süden schließt sich die Trockengrenze des März (3) und des November (11) an. In den feuchteren Gebirgsregionen Marokkos (Mittlerer Atlas) erweisen sich alle Monate des Winterhalbjahres (Oktober bis April) als humid. An der maghrebischen Mittelmeerküste bei Tanger sowie zwischen Algier und Skida sind Oktober und November sowie Januar bis März humid. Zur Sahara hin konzentriert sich die Humidität immer mehr auf die eigentlichen Wintermonate: Dezember bis Februar bzw. Dezember und/oder Januar, in denen die Verdunstung wegen der relativ geringen Einstrahlung ihr Minimum im Jahresgang durchschreitet, während die Niederschläge z. T. erst im März ihr Maximum erreichen. Dann ist in der Regel die Verdunstung jedoch bereits zu intensiv, so daß dieser Monat nicht mehr humid bleibt. Dies gilt auch für die feuchteren Teile der libyschen und ägyptischen Mittelmeerküste.

Der Raum der mediterranen Steppen, der Sahara und der nördlichen Sahelzone weist im klimaökologischen Sinne keinen humiden Monat auf.

Südlich des vollariden nordafrikanischen Trockenraumes, am Nordrande des t r o p i s c h e n A f r i k a, verläuft in der Sahelzone die Trockengrenze 8. Der August ist dort zunächst der einzige humide Monat. Nach Süden hin kommen in der Regel zuerst der Juli und dann der September dazu. Es folgen gegen den Äquator Juni und Oktober, Mai und schließlich der April. An der Küste Westafrikas treten, abgesehen von den Wintermonaten November bis März, auch im Sommer aride Monate auf (kleine Trockenzeit). Dies gilt vor allem für die Monate Juli, August und September, im Extrem auch noch für den Oktober. In Accra und Lomé sind nur der Mai und der Juni klimaökologisch humid. Eine derart ausgeprägte sommerliche Trockenzeit findet sich in den feuchteren Tropen des westlichen Afrika auch noch in Südkamerun und Nordgabun, südlich von Yaundé. Dort sind in der Regel die Monate Juli–August arid und März bis Mai oder Juni sowie September bis November humid.

Die hygrischen Gunsträume Westafrikas liegen an der Küste Liberias und Kameruns. In Monrovia ist das Klima von April bis Dezember humid; zwischen dem Delta des Niger und Kribi in Südkamerun sind es die Monate März bis November. Mit dieser Humiditätsandauer wird nach Überschreiten der Trockengrenze 3, also der Trockengrenze des Monats März, die längste nordhemisphärische Humiditätsandauer im Jahresablauf registriert, die sich regional entlang dem Kongofluß bis an die Ostgrenze der Republik Zaire erstreckt. Nach Süden hin schließt sich daran eine schmale Zone an, in der eine ‚kleine Trockenzeit‘ ausgebildet ist, die etwa bei Boënde die Monate Juni und Juli umfaßt.

Südlich und östlich des äthiopischen Hochplateaus ist das nordhemisphärische Afrika nicht mehr durch ein stetiges und weitgehend zonales Wandern der monatlichen Trockengrenzen charakterisiert. Dort sind lediglich die Frühjahrs- und Frühsommermonate humid oder der Raum ist, wie etwa Somalia, sogar voll-arid.

Südlich des klimatischen Äquators setzt das s ü d h e m i s p h ä r i s c h e Humiditätsregime ein, dort sind in Zaire und Gabun die Monate September bis Mai bzw. weiter im Süden von Oktober bis April humid, also vor allem das südhemisphärische Sommerhalbjahr.

Im feuchteren O s t a f r i k a, das teilweise noch dem Typus des nordhemisphärischen Humiditätsregimes zuzurechnen ist, komplizieren kleinräumige Reliefunterschiede das Bild. Dort sind bis weit in die Südhemisphäre vor allem Mai und April humid. Lediglich Uganda und die höheren Reliefteile Kenyas weisen bei ausgeprägter ‚kleiner Trockenzeit‘ mittsommerliche und spätsommerlich-herbstliche bzw. frühjahrliche

Humiditätsphasen auf. In der unmittelbaren Küstenregion zwischen Mombasa und Sansibar treten ebenfalls von April bis Juni humide Monate auf. Gelegentlich kommt eine dritte Humiditätsphase vor.

Geht man für die weitere S ü d h e m i s p h ä r e Afrikas von der dortigen Trockenregion der Namib-Kalahari-Karru aus, so zeigen sich drei Regionen mit im Jahreslauf zunehmender Humidität: eine im Norden zu den inneren Tropen hin, eine im Südosten und eine im Südwesten. Zum „mediterranen“ Kapland hin werden zunächst die Trockengrenzen 7 und 8 angetroffen. Dies entspricht dem nordafrikanischen Raummuster, wo von der Sahara her primär die Wintermonate Dezember und Januar als humid anzusehen sind. Im westlichen Südafrika folgen zur Küste hin die Trockengrenzen 5 und 6 sowie 9 als Spiegelbild der nordhemisphärischen Maghrebreregion.

Der Südosten S ü d a f r i k a s zeigt räumlich einen ausgesprochenen tropischen Jahresgang der Humidität. Von der zentralen Kalahari-Region her werden zunächst die Sommermonate Januar, Februar und Dezember humid. Darauf folgen zur Küste hin auf engstem Raum die Trockengrenzen 4, 5 und 6 sowie 9, 10 und 11, also diejenigen der südhemisphärischen Herbst-, Frühjahrs- und Frühsommermonate.

Von der vollariden Namib im Westen Südafrikas her gesehen fällt auf, daß in Angola nach Osten hin auf engstem Raum die Trockengrenzen 10–3 aufeinander folgen. Dort finden kaum größere räumliche Verlagerungen der monatlichen Trockengrenzen statt. Der vollaride Raum geht sehr abrupt in ein Gebiet über, in dem die Monate Oktober bis April durchgehend humid sind. Es ist der ökologisch recht einheitlich charakterisierte Raum der Miombo- und Mopanewälder (vgl. LAUER, 1952, S. 85).

Von S ü d w e s t - A f r i k a und Botswana nach Norden zeigt sich ein sehr viel differenzierterer räumlicher Jahresgang der monatlichen Trockengrenzen. In den Monaten Dezember bis März verlagert sich die Trockengrenze zunächst kaum, so daß sich ein ziemlich markanter Übergang vom vollariden Südafrika in ein großes Gebiet mit humiden Bedingungen zwischen Dezember und Februar/März vollzieht. In diesen Monaten verharret die Trockengrenze etwa an der Nordgrenze von Südwest-Afrika, Botswana und der Südafrikanischen Union. Große Distanzen allerdings überwindet die monatliche Trockengrenze in ihrem Jahresgang nach Norden hin, bei südwest-nordost-Orientierung der Grenzlinien, zwischen September, Oktober, November und Dezember, ebenfalls in den Herbstmonaten April, Mai und Juni.

Als wesentliche Merkmale der Karteninterpretation ergeben sich markante Unterschiede zwischen dem Humiditätsregime in den nordhemisphärischen beziehungsweise südhemisphärischen Bereichen Afrikas.

Im n o r d h e m i s p h ä r i s c h e n A f r i k a ist die Südgrenze des jeweils humiden Areal relativ lage-

konstant, dies vor allem in den Sommer- und Wintermonaten. Größere Verlagerungen erfahren die entsprechenden Trockengrenzen in den Übergangsmonaten. Zur Nordgrenze des randtropisch humiden Raumes gegen die Sahara hin verlagern sich die monatlichen Trockengrenzen räumlich und zeitlich im Jahresablauf gleichmäßig bis zum Monat August und wieder nach Süden bis zum Monat Dezember. Auf der Nordhemisphäre des tropischen Afrika wird also zum Sommer hin der humide Raum immer mehr ausgedehnt, da sich dann seine Südgrenze kaum verlagert, die Nordgrenze sich jedoch stetig nordwärts schiebt. Diese nach Norden hin immer kürzer werdende humide Phase, die sich schließlich noch auf einen Sommermonat konzentriert, spiegelt das Bild der Vegetationsgliederung in der Abfolge Feucht-, Trocken-, Dorn-, Wüstensavanne und Wüste wieder.

Im s ü d h e m i s p h ä r i s c h e n A f r i k a sind die Verhältnisse anders geartet. Dort verlagert sich der humide Raum in den Sommermonaten kaum, er ist relativ lagestabil und schiebt sich nur unwesentlich gegen die südhemisphärische Trockenregion vor. Die Verlagerungen der Trockengrenze beschränken sich auf die Übergangsmonate des Jahresablaufes. Zum Trockenraum hin ergibt sich somit eine dichte Scharung der Trockengrenzen, die einen steilen Gradienten der Humidität ausweisen, wohingegen der nordhemisphärisch-tropische Bereich Afrikas einen mehr kontinuierlichen und zonalen Wandel der Humidität erkennen läßt. Das südliche Afrika wird durch große Räume gleichzeitiger und gleichlanger Humidität bei ausgeprägter Trockenzeit gekennzeichnet. Im Gegensatz zu den nordhemisphärischen Savannenformationen herrschen daher weiträumig die oben bereits erwähnten Trockenwälder vor.

Für das äquatoriale West- und Zentralafrika bedeutet die relative Lagekonstanz der nördlichen Trockengrenzen des südhemisphärischen Afrika und der südlichen Trockengrenzen des nordhemisphärischen Afrika eine gleichzeitige und langandauernde Humidität. Es ist der Raum des immergrünen tropischen Tieflandsregenswaldes.

#### *Trockengrenzgang und atmosphärische Zirkulation*

Afrika gilt gemeinhin aufgrund seiner Konfiguration und Lage zum Äquator als Kontinent, in dem der solare, räumliche Klimawandel am deutlichsten ausgebildet ist. Das Kartenbild der Verlagerung der monatlichen Trockengrenzen gibt aber deutlich zu erkennen, daß über die strahlungsbedingte regelmäßige Anordnung der Klimazonen hinaus die atmosphärische Zirkulation mit ihren differenzierten Witterungsercheinungen insbesondere das Niederschlagsregime stärker variiert. Die zeitliche Migration der ‚Innertropischen Konvergenzzone‘ (ITC) – auch als ‚front intertropicale‘ (FIT) bezeichnet (vgl. D.E.M., 1973) –

steuert die Verlagerung der monatlichen Trockengrenzen und verursacht das Detailbild in charakteristischer Weise.

Im tropischen Afrika existieren zwei bedeutende Luftmassengrenzen, an denen es verstärkt zur Niederschlagsbildung kommt. Die mehr ostwest-gerichtete FIT trennt die äquatoriale Westströmung von den zum Teil ektrisch induzierten Strömungsfeldern des Passates, besonders in Form des Harmattan im Bereich des nordafrikanischen Trockenraumes. Die südwest-nordost-gerichtete ‚confluence inter-océanique‘ (CIO) trennt als zweite Störungslinie feuchtere atlantische Luftmassen von relativ weniger feuchter Luft des Indischen Ozean (Abb. 5).

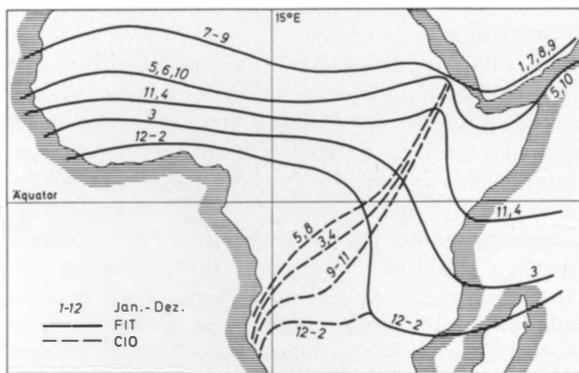


Abb. 5: Die Positionen der FIT (front intertropical) und der CIO (confluence inter-océanique) in Afrika im Jahresablauf (D.E.M. 1973)

The mean positions of the FIT (intertropical front) and the CIO (inter-oceanic confluence zone) in Africa in the course of the year (D.E.M. 1973)

Vergleicht man die Lage beider innertropischer Konfluenzen (FIT und CIO) in der Darstellung nach D.E.M. (1973) in ihrem raumzeitlichen Wandel (vgl. Abb. 5) mit den Positionen der mittleren monatlichen Trockengrenzen (Karte Beilage VIII), so zeigen sich deutliche Übereinstimmungen. Allerdings ist zu beachten, daß die Hauptniederschlagszonen den Konfluenzsystemen erst in ein- bis zweimonatigem Abstand folgen. Die südwest-nordost-orientierten Trockengrenzen stehen mit der CIO in Zusammenhang; die mehr ostwest-, in Zentralafrika auch nordsüd-gerichteten Trockengrenzen mit der FIT (ITC).

Die Wanderung der FIT hängt zwar von der scheinbaren Wanderung der Sonne, also dem solaren Strahlungsklima zwischen den Wendekreisen ab, die vertikale Trogachse ist aber auf der Nordhalbkugel wesentlich stärker gegen den Äquator geneigt als auf der Südhalbkugel (B. W. THOMPSON, 1965). Daher ist offensichtlich das Niederschlagsbild im südhemisphärischen tropischen Afrika weniger differenziert als in Westafrika und der Sudanzone. Dies schlägt sich im

Jahresgang der Trockengrenzen nieder (vgl. Karte Beilage VIII).

Die räumliche Persistenz bzw. Migration der Trockengrenzen hängt in erster Linie von der jahreszeitlichen Verlagerung der subtropischen Hochdruckgebiete ab. Wie die Karte zu erkennen gibt, fluktuieren die monatlichen Trockengrenzen in den humiden Sommer- und den ariden Wintermonaten des tropischen Afrika weniger als in den Übergangsjahreszeiten. Da auch die subtropischen Hochdruckzellen – die eigentlichen Steuerungszentren für die Wanderung der tropischen Trogssysteme – ihre Position in den Übergangsmonten Mai/Juni und Oktober/November relativ abrupt verändern (CHANG, 1972) und sich damit witterungsdynamisch die allgemeine Zirkulation von der Regen- auf die Trockenzeit und vice versa umstellt, ergibt sich eine unmittelbare und kausale Beziehung zwischen beiden Phänomenen.

Auf drei Sonderphänomene des Zusammenhanges zwischen atmosphärischer Zirkulation und der Migration der monatlichen Trockengrenzen soll noch eingegangen werden:

1. Die ‚kleine Trockenzeit‘, die an der Südküste Westafrikas um Accra und Lome eine mittsommerliche Aridität ausdrückt, ist möglicherweise bedingt durch die dort küstenparallele Strömung der äquatorialen Westwinde (vgl. u. a. LAUER, 1952), die vor der Küste im Sinne von EKMAN zum Aufquellen kalten Tiefenwassers führen. Die insgesamt auftretenden Divergenzen im Strömungsbild der Westwinde bewirken diese ariden Sommermonate; ähnlich verhält es sich an der somalischen Küste, wo gleichfalls infolge vielfacher Divergenzerscheinungen des Strömungsfeldes (FLOHN, 1964) während der in gleichen Breiten solarklimatisch zu erwartenden humiden Jahreszeit vollatide Klimazustände herrschen. Für Westafrikas sommerliche Aridität spielt jedoch auch wesentlich der Einfluß des St. Helena-Hochs eine Rolle, das sich im Juni stark meridional ausdehnt und mit seinem Kern nach Norden verlagert. Gerade die Region Accra-Lomé mit ihrem Hinterland gerät dann unter den Einfluß absteigender Luftbewegungen.

2. In Ostafrika zeigen sich markante Feuchteunterschiede zwischen den humiden Erhebungen und dem Tiefland. Dort ist der Höhenrücken in 850mb-Niveau von einem Höhentrog im 700–500mb-Niveau überlagert (THOMPSON, 1965). Höhen, die deutlich über das 850mb-Niveau aufragen, erhalten dadurch mehr Niederschlag als die Tiefländer.

3. Im Osten Südafrikas hängen die monatlichen Trockengrenzen in ihrer Verlagerung unmittelbar von der jeweiligen Position der subtropischen Hochdruckzelle ab. Im Sommer liegt der Osten Südafrikas unter der aufsteigenden Strömung an der Westflanke dieser Hochdruckzelle. Im Winter (April–September) verlagert sich subtropisch-hoher Druck in das Innere des südafrikanischen Kontinents. Der Osten gerät nun un-

ter absteigende Luftbewegungen und wird damit trocken (CHANG, 1972).

Auch im eindeutig außertropischen Afrika steuert die Positionsverlagerung der subtropischen Hochdruckzellen die Migration der Trockengrenzen. Die plötzliche Südverlagerung der subtropischen Hochdruckgebiete in Nordafrika im Übergangsmonat Oktober läßt diesen Monat an den Küsten des Maghreb als ersten humid werden, da nun die niederschlagsgenetisch wirkenden polaren Westströmungen in den Kontinent eindringen können. Humide Bedingungen dauern dann bis in den Mai an, da sich die Hochdruckgebiete erst im Juni wieder markant nach Norden verschieben. Im Bereich des südafrikanischen Kaplandes erweisen sich die Bedingungen ähnlich. Nach der Nordverlagerung der St. Helena-Antizyklone im Juni, zu Beginn des südhemisphärischen Winters, können im Juli humide Monate auftreten. Der Weg der regenbringenden Westwinde auf das Kapland ist dann bis Oktober freigegeben.

#### Literatur

- BOWDEN, B. N.: The dry seasons of intertropical Africa and Madagascar, *Journal of Tropical Geography*, 19, 1964, S. 1-3
- CHANG, JEN-HU: Atmospheric circulation systems and climate, Honolulu, 1972
- D.E.M.: Bureau d'études de la D.E.M.: La structure continue de l'équateur météorologique sur l'Afrique intertropicale. Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et en Madagascar, 29, Dakar, Juli 1973
- FLOHN, H.: Über die Ursachen der Aridität Nordostafrikas, *Würzburger Geographische Arbeiten*, 12, Würzburg 1964
- : Tropical circulation pattern, *Bonner Meteorologische Abhandlungen*, 15, 1971
- GRIFFITHS, J. (Ed.): *Climates of Africa*, World survey of Climatology, Vol. 10, Amsterdam, London, New York, 1972
- HENNING, I. und D. HENNING: Die klimatologische Trockengrenze, *Meteorologische Rundschau*, 29, 5, 1976, S. 142-151
- JAEGER, F.: Die Gewässer Afrikas, *Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde zu Berlin*, Sonderband 1928, S. 158-190
- : Trockengrenzen in Algerien, *Ergänzungsheft 223 zu Petermanns Mitteilungen*, 1936
- KUNZE, S.: „Die kleine Trockenzeit“ im tropischen Afrika, Diss., Bonn, 1974
- LAUER, W.: Humide und aride Jahreszeiten in Afrika und Südamerika und ihre Beziehungen zu den Vegetationsgürteln, *Bonner Geographische Abhandlungen*, 9, Bonn, 1952
- LAUER, W. und P. FRANKENBERG: Untersuchungen zur Ökologiklimatologie des östlichen Mexiko, Erläuterungen zu einer Klimakarte 1:500 000, in: *Klimatologische Studien in Mexiko und Nigeria*, Hrsg.: W. Lauer, *Colloquium Geographicum*, 13, Bonn, 1978, S. 1-134
- : Ökoklimatische Überlegungen zum Problem der Humidität/Aridität. Ein Beitrag zur Klassifikation der Klimate, Vortrag Geographentag Göttingen, 1979
- LAUTENSACH, H.: Die Niederschlagsverhältnisse auf der Iberischen Halbinsel. Eine Geographische Studie, *Pet. Mitt.*, 95, 1951, S. 145-160
- LAUTENSACH, H. und E. MAYER: Humidität und Aridität insbesondere auf der Iberischen Halbinsel, *Pet. Mitt.*, 104, 1960, S. 249-270
- LEBEDEV, A. N.: *The climate of Africa*, Pt. 1, Jerusalem, 1970
- NEWELL, R. E., J. W. KIDSON, D. G. VINCENT und G. J. BOOR: The general circulation of the tropical atmosphere und interactions with extratropical latitudes, Cambridge (Mass.), London, 2 Bde, 1972, 1974
- OKULAJA, F. O.: Synoptic flow perturbations over West Africa, *Tellus*, 23, 1970, S. 663-680
- PALMÉN, E. und C. W. NEWTON: Atmospheric circulation systems, *Internat. Geophysics series*, vol. 13, New York, London, 1969
- PAPADAKIS, J.: *Climates of the world and their agricultural potentialities*, Buenos Aires, 1966
- PENMAN, H. L.: *Vegetation and hydrology*, Techn. Commun., 53, Commonw. agricultural Bureau, Harpenden, 1963
- PENCK, A.: Versuch einer Klimaklassifikation auf physiographischer Grundlage, *Sitzungsberichte der kgl. Preuß. Akad. d. Wiss., Phys. Math. Klasse*, 12, Berlin, 1910, S. 236-246
- RIEHL, H.: *Tropical Meteorology*, New York, 1954
- SCHMIDT, H.: Der jährliche Gang der Niederschläge in Afrika, *Archiv der Deutschen Seewarte*, 46, 1, Hamburg, 1928
- THOMPSON, B. W.: *The climate of Africa*, Nairobi, London, New York, 1965
- THORNTHWAITTE, C. W.: An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, 38, 1948, S. 55-91

