35.0 HORNETZ, B.: Standortbezogene Bestimmung und Optimierung von natürlichen Landnutzungspotentialen mit Hilfe eines agrarökologischen Komplexmodelles an einem Beispiel aus den Tropen

Zusammenfassung

Die traditionelle Agrarklimatologie benutzt auch heute noch weitgehend deskriptive Modelle, die meistens als Einleitungskapitel für nachfolgende, vornehmlich agronomische und nicht-klimatologische Darstellungen dienen.
Trotz der Anwendung von verfeinerten statistisch-empirischen Methoden zur Beschreibung räumlicher und zeitlicher Verteilungsbilder von klimatischen Parametern bleibt in solchen Darstellungen das Problem einer systematischen Einbeziehung dieser Faktoren in das komplexe Interaktionssystem zwischen Kulturpflanzen und ihrer natürlichen Umgebung weitgehend offen.
Da agrarökologische Modelle zur Simulation und Beschreibung von parallelen und synchronen Prozessen in natürlichen Systemen unbedingt erforderlich sind, wurden ein EDV-Programmpaket - bestehend aus mehreren Modulen - und ein Szenarienkonzept auf der Basis von Simulationsrechnungen erarbeitet.
Bestimmte, ökologische Regulationssysteme betreffende Untersuchungen können durch angewandte Fragestellungen, wie z.B. die Möglichkeiten und Probleme der Nahrungsmittelproduktion in den tropischen und subtropischen Entwicklungsländern, initiiert und gesteuert werden. Ein Beispiel aus der Sudansavannen-Region Westafrikas zeigt das wachsende Mißernterisiko für kleinbäuerliche Betriebe infolge der fehlenden Adaptation der weiträumig angebauten Maisbestände gegenüber Trockenstreß einerseits und der Vernachlässigung von trockenresistenten Getreidepflanzen wie Sorghum und Hirse andererseits.
Mit Hilfe agrarökologischer Simulationsrechnungen und dem Szenarienkonzept können Empfehlungen für geeignete agrarische Nutzungsmuster in den betroffenen Gebieten gegeben werden.

Abstract

Traditional agroclimatology is dominated by mainly descriptive models used very often as an "introduction" to subsequent, essentially agronomic, non-climatological chapters isolated of a given agroecological problem.
In spite of sophisticated statistical models for the description of the distribution of climatic parameters in space and time there is still a lack in integrating these factors into more fundamental and systematical approach achieving the qualitative and quantitative description of interactions between cultivated plants and their environments.
Agroecological modelling is necessary in order to assess the problem of performing the parallelity and synchronity in natural processes. Therefore an EDP-program-packet consisting of several modules and a scenario-concept on the basis of simulation computation - both representing ecological processing - are worked out.

Specific researches in ecological regulation systems can be determined by different matters concerning e.g. the problems of food production in the developing countries of the tropics and subtropics.

An example from the Sudan savanna region of West Africa demonstrates the increasing risks of crop failures for smallholder farming caused by the extensively lacking adaptation of the favored maize crop to water stress and the displacement of drought-resistant food crops as sorghum and millets. By the means of agroecological simulation computation and scenario-models it is possible to make recommendations for landuse patterns in those seriously affected areas.

35.1 Einleitung

35.1.1 Problematik der Stabilisierung der Nahrungsmittelproduktion

Die Einführung der Maispflanze als Hauptnahrungskultur in weiten Teilen Afrikas infolge der Kolonialisierung führte sehr häufig zu einer Verdrängung von traditionell an die ökologischen Bedingungen der Feucht-, Trocken- und Dornwälder-Savannen des Kontinents angepaßten Leitkulturen wie Sorghum und Hirse.
Bedingt durch anthropogene Prozesse der Bodendegradierung und durch die Empfindlichkeit der Maispflanze gegenüber Trockeneinbrüchen während der Hauptwachstumsphase kommt es vor allem im Zeitalter der zunehmenden überbevölkerung immer häufiger zur trockenheitsbedingten Unterversorgung mit Brotgetreide.
Es bleibt daher zu diskutieren, ob es für die am stärksten betroffenen Kleinbauern nicht besser wäre, das hohe Risiko des reinen Maisanbaues durch andere, geeignetere agrarische Nutzungsmuster zu ersetzen, um dadurch zu einer Stabilisierung der Nahrungsgrundlage unter Erhaltung bzw. Regenerierung der Bodenfruchtbarkeit zu gelangen.

35.1.2 Die Notwendigkeit systematischer Untersuchungen zur Wasserversorgung von Kulturpflanzen in den tropischen Trockengebieten

Bei der Betrachtung eines definierten agrarischen Standortes in den Tropen unter dem Aspekt der Wasserversorgung der Kulturpflanzen müssen methodisch neue Wege beschritten werden, da statistisch empirische Regenfallanalysen, wie sie in agrarklimatologischen Untersuchungen bisher weltweit dominieren, in ungenügender Form die tatsächlich im Kulturpflanzenbestand herrschenden Wuchsbedingungen widerspiegeln.
An die Stelle rein deskriptiver Arbeitsweisen, in deren Mittelpunkt die wie auch immer statistisch abgesicherte Korrelation zwischen Basis-Klimaparametern wie Niederschlag, Temperatur usw. einerseits und Ertrag andererseits steht - man spricht in diesem Zusammenhang von Klima-/Ertragsfunktion - muß eine systematische, im eigentlichen Sinne des Wortes "ökologische" Betrachtungsweise treten. Diese versucht - soweit derzeit möglich - die komplexen, miteinander vernetzten Teilprozesse Klima, Boden, Pflanze in einem sogenannten "regulatorischen" Rechenmodell zu erfassen. Auf der Basis eines solchen Modells lassen sich dann die verschiedenen Eingangsvariablen in Form von Szenarien arrangieren (operationelles Vorgehen), so daß es simulationstauglich und damit für den Anwender interessant wird.

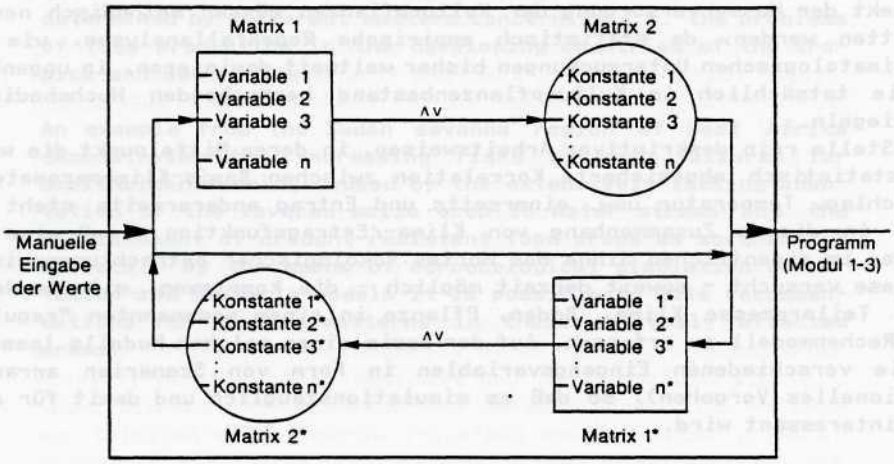
35.2 Methoden

35.2.1 Szenarienkonzept

Wichtigstes Ziel der landwirtschaftlichen Produktion in den Entwicklungsländern sollte die Stabilisierung der Nahrungsmittelproduktion sein. Da jedoch an einem agrarischen Standort mit definierten ökologischen Bedingungen eine Reihe von Landnutzungsmustern betreffend Kulturpflanzen, Kulturtechniken etc. möglich ist, muß man unter der angegebenen Zielsetzung die natürlichen Landnutzungspotentiale optimieren.

Prinzipiell besitzen wir zwei Instrumentarien, mit deren Hilfe sich Aussagen zur effektiven Wasserversorgung von Kulturpflanzenbeständen treffen lassen: erstens

umfangreiche, zeit-, kosten- und personalaufwendige experimentelle Anbauversuche in situ mit dem Vorteil naturwissenschaftlich und empirisch exakter Ergebnisse; zweitens zeit- und kostensparende agrarökologische Simulationsrechnungen mit der systematischen Vernetzung klimatologischer, pedologischer, pflanzenphysiologischer und anbautechnischer Parameter zur Erfassung des natürlichen Landnutzungspotentials eines z.B. infolge von Catenen mosaikförmig ausgestatteten agrarischen Standortes. Dies ist auch deshalb erforderlich, da an einem agrarischen Standort mit definierten ökologischen Bedingungen eine Reihe von Landnutzungsmustern betr. Kulturpflanzen, Kulturtechniken etc. möglich ist.
Um alle für einen Standort möglichen wertemäßigen Kombinationen von pflanzenphysiologischen und pedologischen Faktoren sinnvoll erfassen und darstellen zu können, bietet sich die "Szenarienmethode" an. Ein agrarökologisches Szenarium setzt sich aus klimatologischen, pedologischen und pflanzenphysiologischen Komponenten, basierend auf Originaldaten, zusammen. In der Vielfalt solcher Szenarien liegt die Variationsbreite der natürlichen Rahmenbedingungen für die landwirtschaftliche Produktion. Der Vorteil der Szenarienmethode besteht darin, daß die verschiedenen Wertekonstellationen in Form mehrdimensionaler Matrizen abgespeichert werden können, die eine rasche computermäßige Bearbeitung erlauben (Siehe Übersicht 1).



Übersicht 1. Konfektionierung eines Szenariums

Ziel des Szenarienkonzeptes ist die Austestung von Lösungsmöglichkeiten, die diese Variationsbreite ökologischer Rahmenbedingungen an einem agrarischen Standort erfassen. Agrarökologische Szenarien, die die aktuellen Bedingungen für den Anbau bestimmter Kulturpflanzen am ehesten treffen (= optimale Szenarien), können mit den ökonomischen Möglichkeiten landwirtschaftlicher Betriebe in Zusammenhang gebracht und z.B. nach ergometrischen Kriterien optimiert werden (Konzept eines komplexen optimalen Anbausystems: HORNETZ, 1981).

35.2.2 Datenstruktur und numerischer Ansatz (WATBAL)

Die Niederschlagswerte des untersuchten Standortes in Nordghana[1] (Nyankpala, 0 Grd.59 Min. W, 9 Grd.25 Min. N, 210 m) beziehen sich auf den Beobachtungszeitraum 1953-1983. Die Validitätsprüfung mit Hilfe des ABBE-Testes (HALD, 1952; LINNIK, 1961) ließ auf die Brauchbarkeit dieser Daten schließen.
Zur Berechnung des klimatischen Verdunstungsanspruches (potentielle Evapotranspiration, ETP bzw. hier Eo gemäß PENMAN, 1948) wurden die entsprechend benötigten Parameter einer klimatisch vergleichbaren Station (Tamale) benutzt.
Die Böden wurden von HUIZING (unveröffentl. Manuskript) beschrieben. In diesem Zusammenhang standen weitere unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse über Korngrößenzusammensetzung, maximale pflanzenverfügbare Speicherfeuchte, potentielle Durchwurzelungstiefe und Nährstoffgehalt zur Verfügung.
Die Auswahl der Kulturpflanzen erfolgte gemäß STEINER (1982). Die Berechnung des Pflanzenwasserbedarfs und der Reaktionen der Pflanzen auf die Wasserversorgung wurde nach FAO (1977, 1979) sowie KUTSCH/SCHUH (1980) durchgeführt. Der "(wuchs-)effektive" Niederschlag wurde nach FAO (1974) abgeschätzt.

Der numerische Ansatz zur systematischen Verrechnung aller Parameter (KUTSCH/SCHUH, 1983) wurde erstmals gelegentlich der agroökologischen Zonierung Kenyas (JATZOLD/SCHMIDT, 1982) verifiziert. In ihm werden folgende Teilprozesse berechnet:

- Vorausabschätzung der potentiellen Vegetationsdauer in Abhängigkeit von Klima, Boden und Pflanzenart im Sinne eines zeitlichen Rahmens;
- mittlerer Wasserbedarf der Kulturpflanzen für jeweils 10 Tage, ausgedrückt als physiologischer (phänologischer) Wasserbedarfskoeffizient (kc), als Fraktion (x/100) von ETP bzw. Eo;
- tatsächliches mittleres Tiefenwachstum der Hauptwurzelmasse pro Dekade in Abhängigkeit vom Grad der Wasserversorgung;
- Bodenwasserbilanz innerhalb der durchwurzelten Zone und daraus resultierender Grad der Wasserversorgung (SUP) pro Dekade als Fraktion (x/100) des jeweils errechneten Wasserbedarfs;
- Korrelation zwischen Wasserversorgung und Ertragserwartung mit Hilfe "ertragsrelativierender Faktoren" (ky; FAO, 1979).

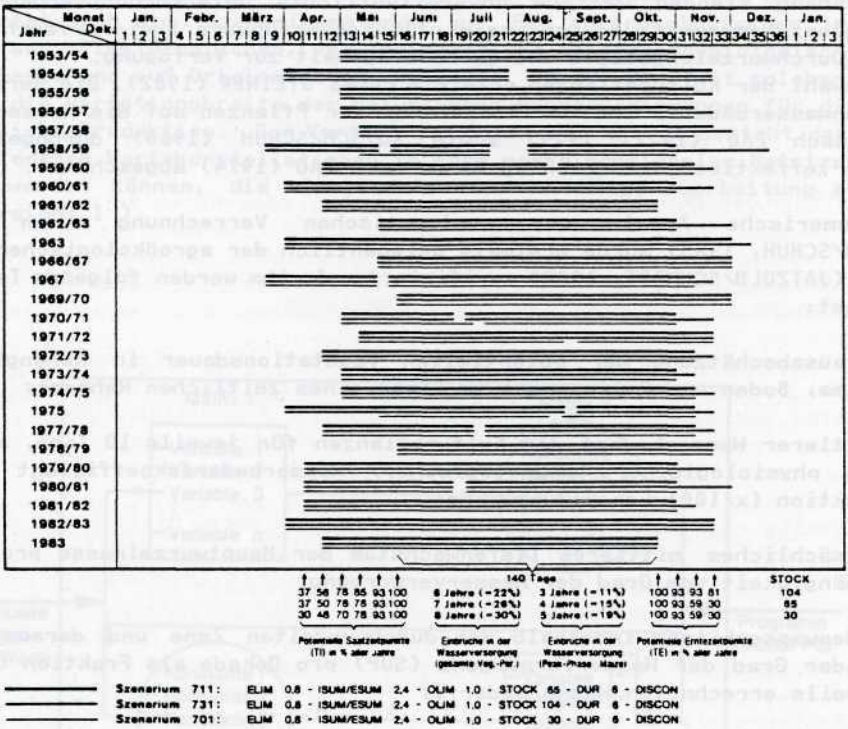
35.3 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund der Daten über die Wasserspeicherfähigkeit und die Zusammensetzung der Böden im Untersuchungsraum, die von HUIZING (1984) und weiteren in situ-Untersuchungen stammen, lassen sich ganz bestimmte pedologische Szenarien konfektionieren und berechnen. Diese können die Variationsbreite der Wasserhaltekapazität und der für das Pflanzenwachstum erforderlichen verfügbaren Bodenfeuchte beschreiben. Die Szenarien 701, 711 und 731 versuchen, bestimmte pedologische Situationen nachzuzeichnen. Szenarium 711 (Übersicht 2) kann aufgrund der ver-

---

[1] Im Zusammenhang mit einer Untersuchung der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) durchgeführt.

wendeten klimatologischen, pedologischen und pflanzenphysiologischen Parameter als repräsentativ für die untersuchte Versuchsstation in der Sudansavanne Westafrikas angesehen werden und zeigt den agrarökologischen Rahmen für den möglichen Anbau definierter Kulturpflanzengruppen (z.B. Mesophyten) auf.



Übersicht 2. Potentielle Anbauphasen/Agrohumide Perioden (AHP) auf der Basis pedologischer Szenarien

Die in einem Teilprogramm (Modul 1; KUTSCH/SCHUH, 1983) verrechneten entsprechenden Szenariumsparameter:

- mittlere Speicherkapazität des Bodens für pflanzenverfügbare Bodenfeuchte von 65 mm auf 50 cm Tiefe bei Luvisols (STOCK);
- Pflanzenwasserbedarf von mindestens 40% der potentiellen Evapotranspiration (kc = 0,4) pro Dekade, bezogen auf die Anfangs- und Endbedingungen des Pflanzenwachstums und ausgedrückt als zu erreichender kumulativer Schwellenwert über einen Zeitraum von vier Dekaden (ISUM/ESUM);

- Festlegung eines unteren, ebenfalls kumulativen Schwellenwertes des Wasserbedarfs in höchstens zwei bis drei Dekaden während der Anbauphase (ELIM, hier 0,8);
- Speicherung von überschüssigem Wasser bei einer Wasserversorgung, die über einen maximalen Wasserbedarf (OLIM), hier entsprechend kc = 1,0, hinausgeht;
- Option Starkregenbedingungen (DISCON);
- Option Mindestlänge einer Anbauphase (DUR, hier: 6)

lassen potentielle Anbauphasen (Agrohumide Perioden, AHP, JÄTZOLD/ SCHMIDT, 1982) von Ende März bis Anfang Dezember als geeignet erscheinen.

Dabei läßt sich gerade zu Beginn der AHP eine sehr große Schwankungsbreite erkennen, die durch das Oszillieren der innertropischen ITC zustandekommen muß. Erst ab Ende Mai/Anfang Juni kann unter den Vorgaben des Szenariums in allen Jahren mit einer für die Startbedingungen der Pflanzen ausreichenden Wasserversorgung gerechnet werden. Dieser Zeitpunkt würde sich für Pflanzen mit mittlerer Vegetationsdauer frühestens als optimaler Saatzeitpunkt festlegen lassen.
Die Dauer der AHP in 74 % aller untersuchten Jahre beträgt etwa 140 Tage und liegt zwischen Ende Mai und Mitte Oktober. In 26 % aller Fälle erfolgt während dieser Zeitspanne ein Einbruch in der Wasserversorgung der Kulturpflanzen, so daß mangelhafte Hydraturbedingungen von mindestens 20 bis 30 Tagen entstehen können; diese Streßsituationen können mit größter Wahrscheinlichkeit von Anfang Juli bis Ende August auftreten (Kleine Trockenzeit).

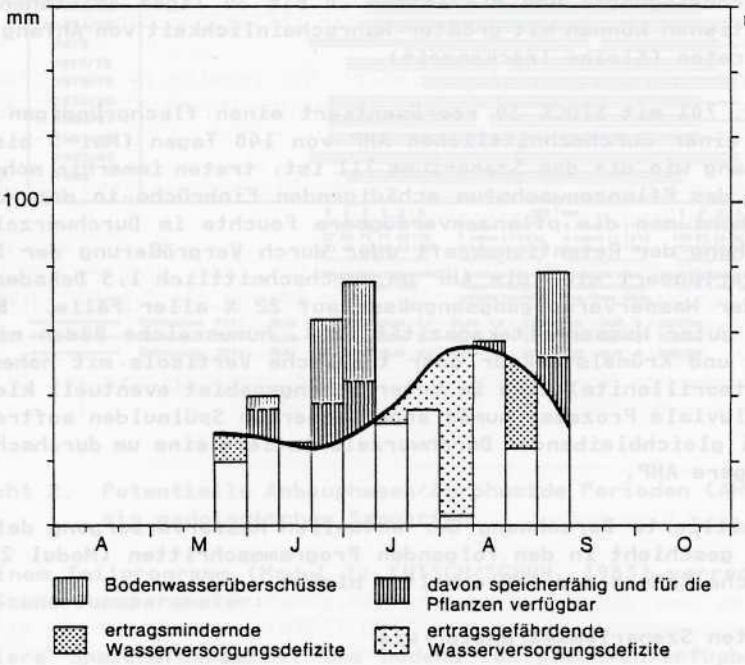
Das marginale Sz. 701 mit STOCK 30 repräsentiert einen flachgründigen sandigen Standort. Trotz einer durchschnittlichen AHP von 140 Tagen (Mai 3 bis Oktober 2), die ebenso lang wie die des Szenariums 711 ist, treten immerhin schon in 30% aller Jahre jene das Pflanzenwachstum schädigenden Einbrüche in der Wasserversorgung auf. Erhöht man die pflanzenverfügbare Feuchte im Durchwurzelungsraum (z.B. durch Erhöhung der Retentionskraft oder durch Vergrößerung der Durchwurzelungstiefe), verlängert sich die AHP um durchschnittlich 1,5 Dekaden; ebenso sinkt die Zahl der Wasserversorgungsengpässe auf 22 % aller Fälle. Böden mit guter bis sehr guter Wasserhaltekapazität (z.B. humusreiche Böden mit ausgeprägter Kolloid- und Krümelstruktur oder tropische Vertisols mit hohem Anteil quellfähiger Montmorillonite), die im Untersuchungsgebiet eventuell kleinräumig in den durch kolluviale Prozesse humos angereicherten Spülmulden auftreten können, besitzen bei gleichbleibender Durchwurzelungstiefe eine um durchschnittlich zwei Dekaden längere AHP.

Die weitere detaillierte Berechnung der aktuellen Wasserversorgung definierter Pflanzenbestände geschieht in den folgenden Programmschritten (Modul 2 und 3), wobei der zeitliche Rahmen der AHP erhalten bleibt.

Die dazu benötigten Szenariumsparameter wie

- Wasserbedarfskoeffizient für die Initialphase des Pflanzenwachstums (KCI*);
- Wasserbedarfskoeffizient für die Hauptphase des Pflanzenwasserbedarfs (KCP);
- Wasserbedarfskoeffizient für die Reifephase (KCM);
- Dauer der Initialphase (PA0);

- zeitliches Intervall vom Ende der Initial- bis zum Anfang der Hauptwasserbedarfsphase (PA);
- Dauer der Hauptwasserbedarfsphase (PB);
- Dauer der Reifephase vom Ende der Hauptwasserbedarfsphase bis zum Eintreten der physischen Reife (PC);
- theoretisches und aktuelles Wurzelwachstum (di, di*);
- geschätztes kapillar aufsteigendes Bodenwasser und frühestmöglicher Zeitpunkt seiner Ausnutzung durch die Wurzeln ab Beginn der AHP (Option);
- maximale (CM) und durch die Pflanzen nutzbare (CE) Wasserspeicherkapazität;
- Niederschlagsverlustbeiwert (R);
- allometrischer Koeffizient zur Wuchsbeziehung zwischen ober- und unterirdischen Pflanzenteilen (V; CAUSTON/VENUS, 1981)



Übersicht 3. Bestandswasserbedarf und tatsächliche Wasserversorgung auf Luvisol mit mittlerer Retentionsfähigkeit (Pflanzenwasserbilanz), Mais (110 Tage bis zur physischen Reife) 1982

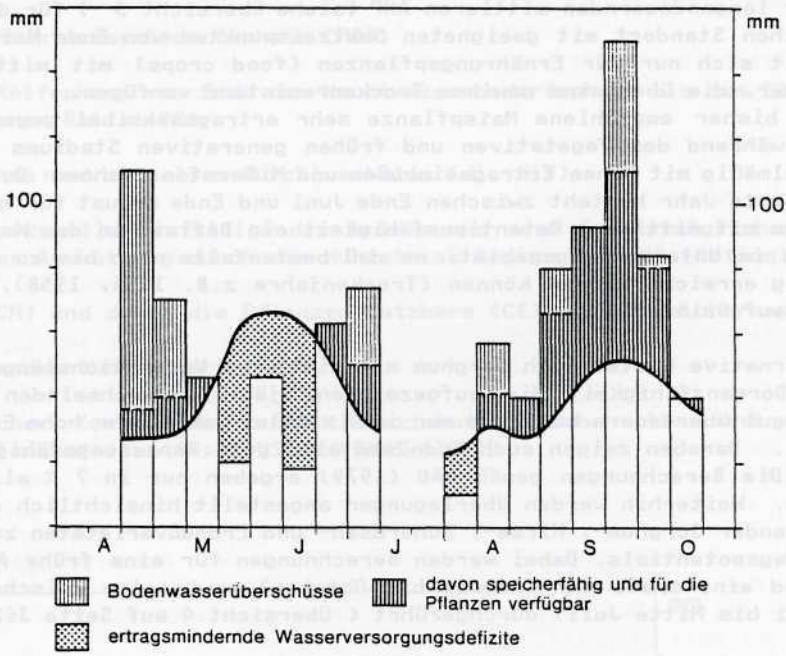
führen schließlich zur Berechnung einer Verteilungskurve der Wasserversorgung (SUP) innerhalb einer definierten AHP (siehe Übersicht 3). Auf deren Basis

ergibt sich - unter der Zielsetzung der Stabilisierung der Ernährungssituation kleinbäuerlicher Familien - folgendes operationalisierbare Schema: Die Ausnutzung der langandauernden mittleren AHP (siehe Übersicht 3) für den angegebenen agrarischen Standort mit geeigneten Saatzeitpunkten von Ende Mai bis Ende Juni empfiehlt sich nur für Ernährungspflanzen (food crops) mit mittlerer Vegetationsdauer, die über eine gewisse Trockenresistenz verfügen.
Da die bisher empfohlene Maispflanze sehr ertragssensibel gegenüber Trockenschüben während des vegetativen und frühen generativen Stadiums reagiert, muß man regelmäßig mit hohen Ertragseinbußen und Mißernten rechnen: Durchschnittlich jedes vierte Jahr besteht zwischen Ende Juni und Ende August für mehrere Dekaden auf Böden mit mittlerer Retentionsfähigkeit ein Defizit in der Wasserversorgung für Mais im Untersuchungsgebiet, so daß bestenfalls noch bis zu 40 % vom Optimalertrag erreicht werden können (Trockenjahre z.B. 1954, 1958), (siehe Übersicht 3 auf Seite 360).

Als Alternative bietet sich Sorghum mit mittlerer Vegetationslänge an, der Dank seiner Dormanzfähigkeit die aufgezeigten, jährlich wechselnden Trockenphasen relativ gut überdauern kann und nur in 4 % aller Jahre sehr hohe Ertragseinbußen erleidet. Daneben zeigen auch Erdnüsse eine gute Anpassungsfähigkeit an aride Phasen: Die Berechnungen gemäß FAO (1979) ergeben nur in 7 % aller Jahre eine Mißernte. Weiterhin werden überlegungen angestellt hinsichtlich der Verwendung frühreifender Sorghum-, Hirse-, Kuherbsen- und Erdnußvarietäten zur Optimierung des Ertragspotentials. Dabei werden Berechnungen für eine frühe AHP (April bis Juni) und eine späte AHP (August bis Oktober) sowie eine Zwischenzenitalphase (Ende Mai bis Mitte Juli) durchgeführt (Übersicht 4 auf Seite 362).

Während Sorghum und Hirse sowie eingeschränkt auch Erdnüsse in der jährlich schwankenden Wasserversorgung der ersten Zenitalphase ihre hohe Ertragsfähigkeit beweisen, können Kuherbsen nur in etwa der Hälfte aller Jahre über 40 % des Optimalertrages erbringen. Es wäre trotzdem zu überlegen, ob man diese Leguminosen nicht schon allein wegen ihrer humuspflegenden Wirkung anbauen sollte.

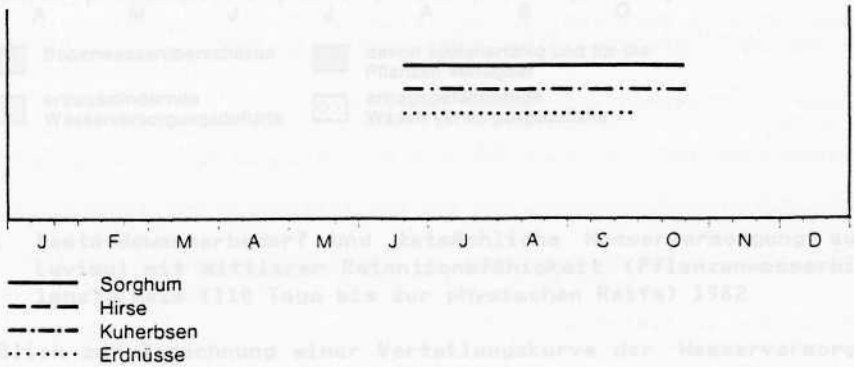
Die zweite Zenitalphase bzw. AHP bietet schließlich für alle im Programm getesteten frühreifenden Pflanzenvarietäten ausreichende hygrische Verhältnisse zur Erzielung guter bis sehr guter Ernten in fast allen beobachteten Jahren (Übersicht 4). Das einzige Problem während dieser Anbauphase bilden die berechneten, häufig auftretenden Überwässerungen der Kulturpflanzenbestände infolge erhöhter Niederschlagsfrequenz, vor allem in der Anfangsphase der Vegetationsperioden.



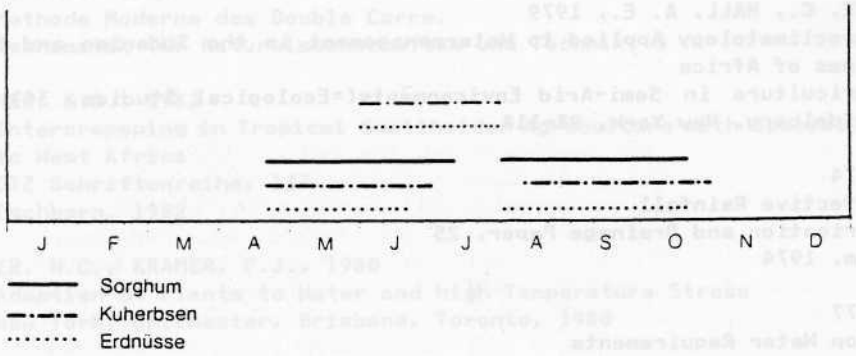
Übersicht 4. Bestandswasserbedarf und tatsächliche Wasserversorgung auf Luvisol mit mittlerer Retentionsfähigkeit (Pflanzenwasserbilanz), Sorghum (80 Tage bis zur physischen Reife) 1982

Es bieten sich aufgrund der oben aufgezeigten Aspekte eine Reihe von Anbaumustern an, von denen hier kurz drei Beispiele vorgestellt werden sollen:

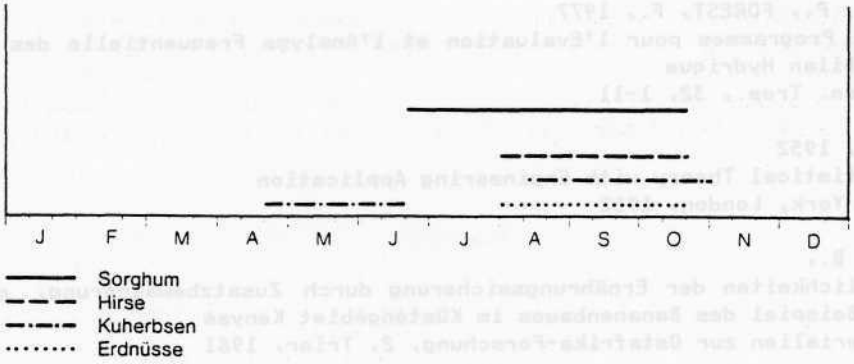
1. Mittelzyklische Anbauszenarien mit der Leitkultur Sorghum (potentieller Saatzeitpunkt: Juni 1 bis Juli 1) und den Begleitkulturen Erdnüsse und Kuherbsen



2. Kurzzyklische Anbauszenarien in der ersten und zweiten Zenitalphase (mit zwischenzeitlichem Anbau)



3. Kurzzyklische und mittelzyklische Anbauszenarien (Relay planting)



35.4 Literaturverzeichnis

1)CAUSTON, D.R., VENUS, J.C., 1981
The Biometry of Plantgrowth
London, 1981

2)DANCETTE, C., HALL, A. E., 1979
Agroclimatology Applied to Watermanagement in the Sudanian and Sahelian Zones of Africa
Agriculture in Semi-Arid Environments(=Ecological Studies, 34) Berlin, Heidelberg, New York, 98-118

3)FAO, 1974
Effective Rainfall
Irrigation and Drainage Paper, 25
Rom, 1974

4)FAO, 1977
Crop Water Requirements
FAO Irrigation and Drainage Paper, 24
Rom, 1977

5)FAO, 1979
Yield Response to Water
FAO Irrigation and Drainage Paper, 33
Rom, 1979

6)FAO, 1982
Potential Population Supporting Capacities of Lands in the Developing World
Technical Report of Projects Int./75/P13)
Rom, 1982

7)FRANQUIN, P., FOREST, F., 1977
Des Programmes pour l'Evaluation et l'Analyse Frequentielle des Termes du Bilan Hydrique
Agron. Trop., 32, 1-11

8)HALD, A., 1952
Statistical Theory with Engineering Application
New York, London, 1952

9)HORNETZ, B.,
Möglichkeiten der Ernährungssicherung durch Zusatzbewässerung, gezeigt am Beispiel des Bananenbaues im Küstengebiet Kenyas
Materialien zur Ostafrika-Forschung, 2, Trier, 1981

10)JÄTZOLD, R. ,SCHMIDT, H., 1982
Farm Management Handbook of Kenya,
Vol. II, Part A West Kenya, Nairobi

11)KOITZSCH, R., 1977
Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtenmodell
Zeitschrift für Meteorologie, 27, 302 - 306

12)KUTSCH, H., SCHUH, H.-J., 1983
Simplified Computer-Based Modelling of Waterbalance in Defined Crop Stands
Informationsverarbeitung Agrarwissenschaften, 7, 239-253
München 1983

13)LINIK, J.W., 1961
Methode Moderne des Double Carre.
Mathematik für Naturwissenschaften und Technik, 5

14)STEINER, K.G., 1982
Intercroppping in Tropical Smallholder Agriculture with Special Reference to West Africa
GTZ Schriftenreihe, 137
Eschborn, 1982

15)TURNER, N.C., KRAMER, P.J., 1980
Adaption of Plants to Water and high Temperature Stress
New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1980

16)WIRTH, E., 1979
Theoretische Geographie
Stuttgart, 1979