

Biologische und chemische Bodencharakteristika zur Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Landnutzungssystemen in der Zona Bragantina, Ost-Amazonien



Ulrich Diekmann

Göttingen 1997

Biologische und chemische Bodencharakteristika zur Beurteilung der
nachhaltigen Produktivität von Landnutzungssystemen
in der Zona Bragantina, Ost-Amazonien

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Ulrich Diekmann
geboren in Hameln

Göttingen, September 1997

Titelbild: Luftbild des Feldversuches 'Iracema' (Ausschnitt)

Die Aufnahme wurde mit Hilfe eines Drachen gemacht, unter den eine Kamera gehängt wurde. Zu sehen sind Parzellen mit der Ausgangsvegetation, Parzellen mit geschlagener, jedoch nicht verbrannter Vegetation sowie gebrannte Parzellen.

D7

1. Referent: Prof. P.L.G. Vlek

2. Korreferent: Prof. N. Claassen

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.1997

INHALT

I EINLEITUNG	1
II LITERATURÜBERSICHT	2
III MATERIAL UND METHODEN	6
1 STANDORTBESCHREIBUNG.....	6
1.1 Geographische Lage.....	6
1.2 Landnutzung.....	7
1.3 Boden.....	8
1.4 Klima.....	11
2 FORSCHUNGSANSATZ UND METHODISCHE VORGEHENSWEISE.....	11
3 FELDMETHODEN.....	12
3.1 Chronosequenzen.....	12
3.2 Feldversuche.....	15
3.2.1 Der 'Cumarú'/Iracema'-Versuch.....	15
3.2.2 Der 'Chagas'-Versuch.....	20
4 LABORMETHODEN.....	22
4.1 Boden.....	22
4.1.1 Probenbehandlung.....	22
4.1.2 Biologische Parameter.....	22
4.1.2.1 Enzymatische Aktivitäten.....	22
4.1.2.2 Mikrobielle Biomasse.....	25
4.1.2.3 Mikrobielle Respiration.....	26
4.1.3 Chemische Parameter.....	27
4.1.3.1 Labor-Vergleich.....	29
4.1.4 Physikalische Parameter.....	31
4.2 Pflanzen.....	32
5 AGRONOMISCHE ERHEBUNGEN.....	32
5.1 Ernte.....	32
6 KLIMATOLOGISCHE ERHEBUNGEN.....	33
6.1 Niederschlag.....	33
7 STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	36
7.1 Die Faktorenanalyse.....	36
7.2 Die Diskriminanz-Analyse.....	38

IV ERGEBNISSE UND DISKUSSION**39**

1 KULTURPFLANZENERTRÄGE.....	39
1.1 Mais (<i>Zea mays</i>)	39
1.2 Maniok (<i>Manihot esculenta</i>).....	42
1.3 Bohnen (<i>Vigna unguiculata</i>).....	47
2 DIE BRACHEPHASE DES TRADITIONELLENANBAUSYSTEMS	48
2.1 Bodenchemische Veränderungen während der Brachephase des traditionellen Anbausystems	48
2.2 Bodenbiologische Veränderungen während der Brachephase des traditionellen Anbausystems	55
2.2.1 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten während der Brachephase.....	55
2.2.2 Mikrobielle Biomasse	71
2.2.3 Mikrobielle Respiration	76
2.2.4 Aktive mikrobielle Biomasse (qCO ₂).....	77
2.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Brachephase	78
3 DIE ANBAUPHASE DES TRADITIONELLENANBAUSYSTEMS	80
3.1 Bodenchemische Veränderungen im Verlauf der traditionellen Anbauphase	80
3.2 Bodenbiologische Veränderungen im Verlauf der traditionellen Anbauphase	90
3.2.1 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten im Verlauf der traditionellen Anbauphase.....	90
3.3 Bilanzierung des Effektes der traditionellen Anbauphase	98
3.3.1 Effekt des traditionellen Anbaus auf die bodenchemischen Parameter	98
3.3.2 Effekt des traditionellen Anbaus auf die enzymatischen Aktivitäten	100
3.3.3 Effekt des traditionellen Anbaus auf die mikrobielle Biomasse und die mikrobielle Respiration.....	101
3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der traditionellen Anbauphase	103
4 MODIFIZIERTE ANBAUSYSTEME	105
4.1 Anbau ohne Brennen	105
4.1.1 Veränderung der chemischen Bodenparameter durch den Verzicht auf das Brennen	105
4.1.1.1 Phosphorbilanz im traditionellen Anbausystem und im Anbau ohne Brennen am Standort Cumarú ...	109
4.1.2 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten durch den Verzicht auf das Brennen	113
4.1.3 Veränderung der mikrobiellen Biomasse (C _{mik} , P _{mik}) und mikrobiellen Respiration durch den Verzicht auf das Brennen	116
4.2 Integration von Leguminosen	118
4.3 Änderung der Art und Menge der Düngergabe	120
4.3.1 Erhöhung der NPK-Düngung	120
4.3.2 Rohphosphat-Düngung	121
4.4 Durchführung einer Bodenbearbeitung	122
4.5 Semipermanenter Anbau.....	124
4.5.1 Veränderung chemischer Bodenparameter im semipermanenten Anbau	124
4.5.2 Veränderung biologischer Bodenparameter im semipermanenten Anbau.....	128
4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der modifizierten Anbausysteme	130

5	BEZIEHUNG ZWISCHEN DEN BODENDATEN UND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN PRODUKTIVITÄT.....	132
5.1	<i>Ursachen für die unterschiedlich hohe landwirtschaftliche Produktivität im traditionellen Anbau der Standorte Cumarú, Iracema und Chagas</i>	132
5.1.1	Ursachen für die unterschiedlich hohen Mais- und Maniokerträge	133
5.1.2	Ursachen für die höheren Bohnenerträge in Cumarú gegenüber Iracema	138
5.2	<i>Ursachen für den Mehr- bzw. Minderertrag bei Mais in Cumarú bzw. Iracema im Anbausystem ohne Brennen gegenüber dem traditionellen Anbau</i>	141
5.3	<i>Ursachen für den Mehrertrag bei Mais im Anbau mit erhöhter NPK-Düngung</i>	145
5.4	<i>Ursachen für den Mehrertrag bei Maniok im Anbausystem mit Bohnen (Vigna unguiculata) gegenüber dem traditionellen Anbau</i>	147
5.5	<i>Ursachen für den Minderertrag bei Maniok in Cumarú im Anbausystem mit Bohnen als Untersaat (Canavalia ensiformis) gegenüber dem traditionellen Anbau</i>	149
5.6	<i>Ursachen für den Minderertrag bei Maniok im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung</i>	151
5.7	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	153
6	BEZIEHUNG ZWISCHEN DEN BODENDATEN UND DER NUTZUNGSINTENSITÄT VON ANBAUSYSTEMEN.....	154
6.1	<i>Visualisierung des Zeitreihencharakters der Phasen des traditionellen Anbausystems</i>	154
6.2	<i>Bewertung der Nutzungsintensität modifizierter Anbausysteme</i>	155
6.3	<i>Bedeutung einzelner Bodenparameter für die Diskriminierung verschiedener Anbausysteme</i>	157
V ABSCHLIEßENDE DISKUSSION		159
	ZUR PROBLEMATIK DER BEURTEILUNG DER NACHHALTIGEN PRODUKTIVITÄT VON NUTZUNGSSYSTEMEN.....	159
	DIE BEDEUTUNG DER BRACHEVEGETATION IM TRADITIONELLEN ANBAUSYSTEM.....	162
	MÖGLICHKEITEN DER MODIFIKATION DES TRADITIONELLEN ANBAUSYSTEMS	163
VI ZUSAMMENFASSUNG		165
	SUMMARY	169
	RESUMO	172
VII LITERATUR		176

ANHANG

Abkürzungen

aK	austauschbare Kationen
C _{mik}	mikrobieller Biomasse-Kohlenstoff
CO ₂	basale mikrobielle Respiration
CO _{2i}	induzierte mikrobielle Respiration
C _{org}	organischer Kohlenstoff
KAK	Kationenaustauschkapazität
N _t	Gesamt-Stickstoff
P _i	extrahierbarer Phosphor
P _i (NC)	extrahierbarer Phosphor (North Carolina-Methode)
P _i (Ol)	extrahierbarer Phosphor (Olsen-Methode)
P _{org}	organischer Phosphor
P _t	Gesamt-Phosphor
P _{mik}	mikrobieller Biomasse-Phosphor
qCO ₂	aktive mikrobielle Biomasse (CO ₂ /C _{mik})
qCO _{2i}	aktive mikrobielle Biomasse (CO _{2i} /C _{mik})
*	signifikant (p < 0,05)
**	signifikant (p < 0,01)
***	signifikant (p < 0,001)
ns	nicht signifikant

Einleitung

Bereits vor über einhundert Jahren begann die Besiedlung und landwirtschaftliche Nutzung der 'Zona Bragantina' im Osten des Amazonasgebietes Brasiliens. Dreiviertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche entfallen heutzutage auf Flächen, die von Kleinbauern bewirtschaftet werden (IBGE 1985). Es werden vorrangig Mais, Reis, Bohnen und Maniok für den Eigenbedarf angebaut. Zur Erwirtschaftung monetären Einkommens dient neben der Herstellung der sog. *farinha de mandioca* (Maniokgrieß) der Anbau semipermanenter Kulturen wie Maracujá (*Passiflora edulis*) und Pfeffer (*Piper nigrum*), deren Bedeutung stark marktabhängig ist.

In der Subsistenzwirtschaft entstand ein kleinbäuerliches Anbausystem, in dem die spontan aufwachsende Sekundärvegetation als Brachevegetation genutzt wird. Die Dauer der Anbauphase beträgt im allgemeinen zwei Jahre. Bereits ein halbes Jahr vor der Maniokernte wird nicht mehr gehackt, so daß die Sukzession der Sekundärvegetation bereits vor dem Ende der Anbauphase einsetzt. Die Brachedauer beträgt 4-10 Jahre und hängt immer weniger davon ab, ob der Kleinbauer die Zeit für gekommen erachtet, seine Flächen in Kultur zu nehmen. Ein zunehmender Landdruck hat in den vergangenen Jahren dazu geführt, daß sich die Brachezeiten verkürzten. Da während der Brache die für die Bodenproduktivität maßgeblichen Faktoren auf ein für den Anbau von Feldfrüchten notwendiges Maß gebracht werden sollen, verringert die Verkürzung der Brachedauer grundsätzlich die landwirtschaftliche Produktivität.

SANCHEZ (1976) sprach ganz allgemein davon, daß während der Anbauphase die Bodenproduktivität abnimmt und während der Brachephase zunimmt. Doch welche Bodencharakteristika bedingen diese Veränderungen? In Publikationen wird immer wieder betont, wie ausgesprochen gering in diesem Zusammenhang doch die Anstrengungen der Forschung auf dem Gebiet der Bodenmikrobiologie sind - gemessen an deren großen Bedeutung für die Nährstoffkreisläufe auf produktionschwachen, tropischen Böden (z.B. KENNEDY & SMITH 1995).

Insbesondere bei der Beurteilung von landwirtschaftlichen Nutzungssystemen hinsichtlich deren Nachhaltigkeit könnten bodenmikrobielle Aktivitäten ein wichtiges Kriterium darstellen. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß Indikatoren gefunden werden, mit deren Hilfe man in der Lage ist, mit relativ einfachen Mitteln bodenbiologische und -biochemische Prozesse zu charakterisieren.

Vorrangige Zielsetzung dieser Arbeit war es, die Veränderung chemischer und biologischer Bodencharakteristika während der Anbau- und der Brachephase zu erfassen. Im Mittelpunkt stehen hierbei dynamische Parameter, mit deren Hilfe Aussagen über die Aktivitäten und das Potential von Mikroorganismen im Boden und somit über die Intensität von Umsetzungsprozessen in den Nährstoffkreisläufen möglich sein sollen. Es soll geprüft werden, ob sich diese Parameter als Indikatoren für die nachhaltige Produktivität der Nutzungssysteme eignen.

Zweiter Aspekt der Arbeit war es zu untersuchen, welchen Effekt Modifikationen des traditionellen Anbausystems auf die als maßgeblich/bedeutsam identifizierten Parameter und somit auf die nachhaltige Produktivität haben.

Mit Hilfe multivariater statistischer Analyseverfahren wird (a) der Zeitreihencharakter des traditionellen Anbaus dargestellt, auf dessen Grundlage (b) modifizierte Anbausysteme hinsichtlich ihrer Nutzungsintensität beurteilt werden und (c) die Bedeutung der einzelnen Bodenparameter ermittelt wird.

Nicht zuletzt praktische Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es (a) eine Aussage über die notwendige Dauer der Brachephase zu treffen, damit trotz landwirtschaftlicher Nutzung die nachhaltige Produktivität des Nutzungssystems gesichert ist, und (b) Vorschläge für Modifikationen des traditionellen Anbausystems zu machen.

II Literaturübersicht

Shifting cultivation-Systeme sind in weiten Teilen der Tropen die vorherrschende Anbauform im Kleinbauernmilieu. In diesen Systemen spielen Sekundärwälder eine wichtige Rolle als Brachekomponente. AHN (1979) sieht vor allem drei Funktionen der Brache: (a) den Schutz des Bodens vor hohen Temperaturen und Regenfällen, (b) eine Anbaupause zur Verringerung des Krankheits- und Schädlingsdrucks sowie der Unkrautkonkurrenz und (c) eine Verbesserung der physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften. Diese Verbesserung der Bodeneigenschaften basiert nach AHN (1979) einerseits auf dem Anstieg der organischen Substanz, verursacht durch den stetigen Eintrag von Pflanzenmaterial, vor allem über die Streu. Andererseits fungiert die Brachevegetation als eine Art Pumpe, mit deren Hilfe Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten zuerst in die Pflanzen und dann über die Streu in den Oberboden verlagert werden.

SANCHEZ (1976) sprach ganz allgemein davon, daß die Bodenproduktivität während der Brachephase zunimmt und während der Anbauphase abnimmt, ohne zu spezifizieren, welche Bodencharakteristika diese Veränderungen bedingen.

Bei der Ursachenforschung für die Veränderung der Bodenproduktivität stand bisher die Untersuchung bodenchemischer Parameter im Vordergrund. Dabei wurde i.a. ein enger Zusammenhang zwischen der Dauer der Brachephase und der Akkumulation von Nährstoffen im Boden sowie deren Abnahme während der Anbauphase nachgewiesen. Wichtige Publikationen stammen von NYE (1958) und GREENLAND & NYE (1959 in Ghana), AWETO (1981 in Nigeria); UHL & JORDAN (1984 in Amazonien, Venezuela), ANDRIESSE & KOOPMANS (1984) und ANDRIESSE & SCHELHAAS (1987 in Malaysia), SAXENA & RAMAKRISHNAN (1986 in Nordost-Indien). Den Effekt des Kahlschlagens und Brennens eines Primärwaldes in Manaus, Zentralamazonien (Brasilien), untersuchten BRINKMANN & NASCIMENTO (1973), in Nigeria AYANABA et al. (1976).

Besonderes Interesse galt der Dynamik der organischen Substanz, da ihr hinsichtlich der Bodenproduktivität eine Schlüsselrolle beigemessen wird (CERRI et al. 1991, MARTINS et al. 1990a,b, 1991, DIEZ et al. 1991, BONDE et al. 1992 in Amazonien, WADSWORTH et al. 1988 in Mexiko, AHN 1979 u.a. in Westafrika).

Es muß jedoch festgestellt werden, daß weder Informationen über Nährstoffverhältnisse noch über Gehalte an organischer Substanz ausreichen, den Zustand eines Bodens vor allem im Hinblick auf die nachhaltige Produktivität von Nutzungssystemen zu beurteilen. So ist es nur folgerichtig, wenn von zahlreichen Autoren (z.B. KENNEDY & SMITH 1995, WOOD 1991) die Notwendigkeit gesehen wird, in verstärktem Maße bodenbiologische Parameter zu untersuchen.

Mikroorganismen stellen das Bindeglied zwischen den anorganischen und den organischen Kompartimenten des Bodens dar. Ihre vordergründige Rolle - aus Sicht des Pflanzenproduzenten - besteht darin, daß sie organisch gebundene Nährstoffe mineralisieren, so daß diese in eine pflanzenverfügbare Form überführt oder durch Einbau in die Körpersubstanz immobilisiert werden. Darüber hinaus haben mikrobielle Prozesse eine grundlegende Bedeutung für die Dynamik der organischen Substanz. Die größte Bedeutung kommt hierbei Bakterien und Pilzen zu, die über die Ausscheidung teils spezifischer, teils unspezifischer Enzyme eine Spaltung organischer Verbindungen bewirken. Eine bedeutende Rolle spielen hierbei Enzyme, da sie praktisch alle im Boden ablaufenden metabolischen Vorgänge katalysieren. Die Enzymsynthese durch Mikroorganismen hängt einerseits vom Organismus selbst ab, andererseits vom Milieu, was bedeutet, daß sie durch die Anwesenheit verwertbarer Substrate induziert werden kann ('Produkt-Induktion'). Umgekehrt geht in den meisten Fällen die Einstellung der Enzymsynthese vom Endprodukt aus - was als 'Endprodukt-Repression' oder 'Endprodukt-Hemmung' bezeichnet wird (SCHLEGEL 1992).

Zu einer weit rascheren Anpassung an veränderte Lebensbedingungen kann es durch Änderung der katalytischen Aktivität der Enzyme kommen. Insofern spiegeln enzymatische Aktivitäten im Boden die Lebensbedingungen der Mikroorganismen wider und lassen darüber hinaus Rückschlüsse über das Ausmaß mikrobieller Stoffumsätze zu.

Schon früh erkannte man, daß enzymatische Aktivitäten ein Maß für mikrobielle Stoffumsätze im Boden sein könnten. Anfangs wurde jedoch oftmals die Komplexität des Milieus und damit die Fülle von Einflußfaktoren unterschätzt (siehe z.B. HOFMANN & HOFFMANN 1966). In der Folgezeit befaßten sich zahlreiche wissenschaftlichen Arbeiten daher gerade mit diesem Themenkomplex.

MALKOMES (1991a) wies nach, daß enzymatische Aktivitäten dem Einfluß von Feuchtigkeit, Durchlüftung und Temperatur des Bodens unterliegen, ROJO et al. (1990) fanden eine Abhängigkeit vom pH-Wert. MAKBOUL & OTTOW (1979), TABATABAI (1982), SARKAR et al. (1989) und RASTIN et al. (1988) wiesen nach, daß Tonminerale und organische Substanzen als Adsorbenten von Bodenenzymen fungieren können, wodurch einerseits deren Aktivität herabgesetzt, sie andererseits gegen biotische als auch abiotische Destruktion geschützt wird. STOJANOVIC (1959; für Urease), COOPER (1972; für Aryl-Sulfatase) sowie RASTIN et al. (1988) belegen die Bedeutung der Klimaverhältnisse für die bodenenzymatischen Aktivitäten. Der Einfluß der Vegetation wird u.a. von PANCHOLY & RICE (1973), DUXBURY & TATE (1981), TARAFDAR & JUNGK (1987), LIJEROTH & BAATH (1988, Sukzession) und TATE et al. (1991) beschrieben. Die Urease-Aktivität fand besonderes Interesse in Zusammenhang mit Volatisierungsverlusten von Stickstoff im Naßreisbau. Im Bereich der Rhizosphären-Forschung ist die Untersuchung der Phosphatase-Aktivität als Bestandteil von Wurzelexsudaten von Bedeutung (z.B. TARAFDAR & JUNGK 1987).

Seit Mitte der 80er Jahre kam es zu einer regelrechten Renaissance des Einsatzes bodenenzymologischer Methoden in Zusammenhang mit den Untersuchungen von Umwelteinflüssen durch Schwermetalle und Agrotoxika (z.B. MALKOMES 1991b).

Ein weiterer Ansatz zur Charakterisierung biologischer Bodeneigenschaften ist die Analyse von in der mikrobiellen Biomasse gebundener Bioelemente, insbesondere von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor. Die mikrobielle Biomasse umfaßt Bakterien, Actinomyceten, Pilze, Protozoen und die Mikrofauna und kann als lebender Bestandteil der organischen Substanz im Boden aufgefaßt werden. Ihr Anteil an der organischen Substanz beträgt ca. 1-4 %. Dieser Prozentsatz ist ein Maß für die mikrobiell festgelegten und relativ leicht mobilisierbaren Nährstoffe, die besonders auf Böden mit niedrigem Produktionsniveau eine bedeutende Rolle

spielen (SINGH et al. 1989). Der Prozentsatz der sich im aktiven Zustand befindlichen Mikroorganismen, ausgedrückt durch den sog. metabolischen Quotienten 'qCO₂' (ANDERSON & DOMSCH 1990) schwankt zwischen 2-30 % (SCHINNER et al. 1991), ist also sehr variabel. Er wird als Maß für die Abbaurate der organischen Substanz gesehen (POWLSON & BROOKES 1987; INSAM & DOMSCH 1988; ANDERSON & DOMSCH 1989 und 1990; SPARLING 1992).

SPARLING (1992) bewertet den Anteil metabolisch aktiver Mikroorganismen als geeigneten Indikator, um den Zustand eines Bodens in Hinblick auf die Nachhaltigkeit der Nutzungsform zu beurteilen. Wie diese Indikatoren interpretiert werden, ist jedoch teilweise widersprüchlich. So deutet nach SPARLING (1989) eine hohe Mikroorganismen-tätigkeit auf einen Mangel an pflanzen- bzw. mikroorganismenverfügbaren Nährstoffen hin, TATE et al. (1991) erwarten hingegen in "armen" Böden ein geringe mikrobielle Aktivität.

Die Bestimmung dieses Anteils aktiver Mikroorganismen kann einerseits undifferenziert für die gesamte mikrobielle Biomasse über die Atmungsrate erfolgen. Andererseits ermöglicht die Erfassung der Nährstoffgehalte in der mikrobiellen Biomasse eine Quantifizierung des mikrobiellen Umsatzes in spezifischen Nährstoffkreisläufen des Bodens.

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten befassen sich damit, welche Faktoren die Höhe und Aktivität der mikrobiellen Biomasse beeinflussen. Es untersuchten u.a. den Einfluß diverser Bodeneigenschaften GREGORICH et al. (1991), klimatischer Bedingungen HATTORI (1973, zit. in TATE et al. 1991), INSAM et al. (1989), MALKOMES (1991a,b), TATE et al. (1991), der Vegetation bzw. Formen der Landnutzung AYANABE et al. (1976), FRASER et al. (1988), INSAM & HASSELWANDTER (1989), SRIVASTAVA & SINGH (1989), BONDE et al. (1991) und LUIZÃO et al. (1991 in Zentral-Amazonien). Übersichtsartikel über die mikrobielle Biomasse stammen u.a. von SPARLING (1982; 1985; 1990; 1991).

Seit Mitte der 80er Jahre wurde die mikrobielle Biomasse in verstärktem Maße als potentieller Indikator für die Produktivität von Ökosystemen entdeckt (z.B. ANDERSON & DOMSCH 1990, JORDAN et al. 1995, KLEINMAN et al. 1996).

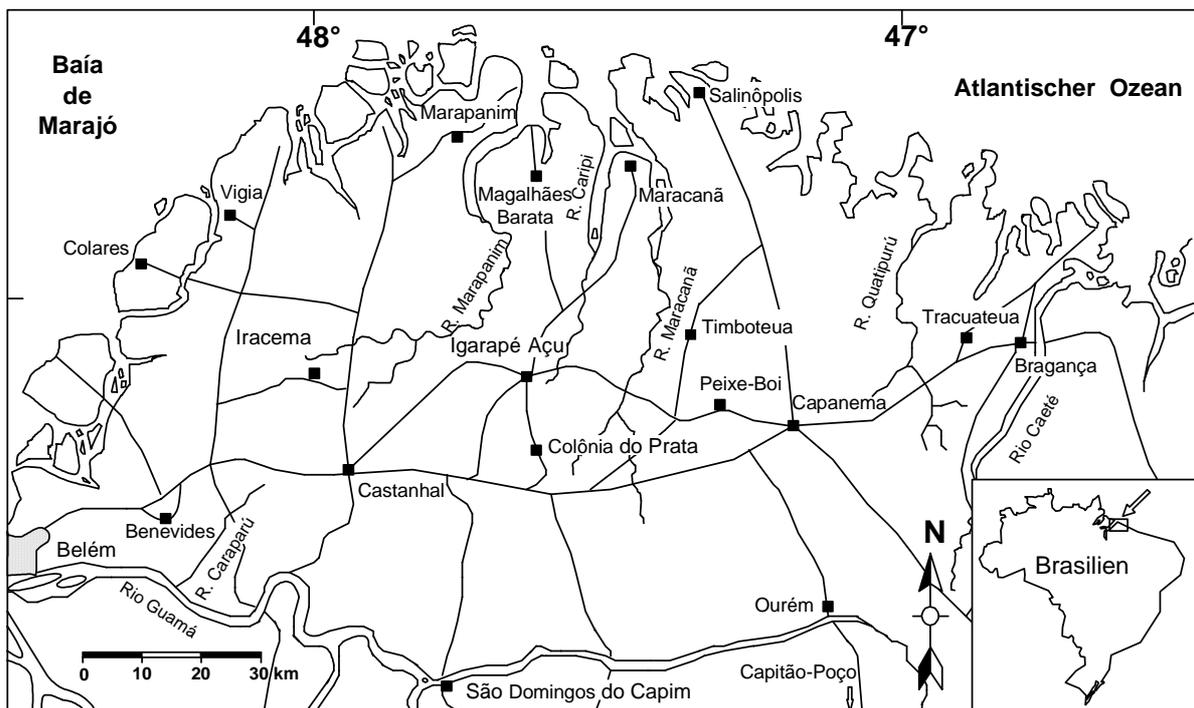
III Material und Methoden

1 Standortbeschreibung

1.1 Geographische Lage

Die Zona Bragantina liegt im östlichen Amazonasgebiet im Bundesstaat Pará, zwischen $0^{\circ} 45'$ und $1^{\circ} 39'$ südlicher Breite und $46^{\circ} 16'$ und $48^{\circ} 15'$ westlicher Breite. Der größte Teil der Felduntersuchungen fand südlich von Igarapé Açu statt, das ca. 110 km östlich von Belém liegt, einige wenige Untersuchungen in Iracema, ca. 20 km nördlich von Castanhal (Abbildung 1). Die Untersuchungsflächen liegen ca. 45 km Luftlinie voneinander entfernt.

a)



Fortsetzung

b)

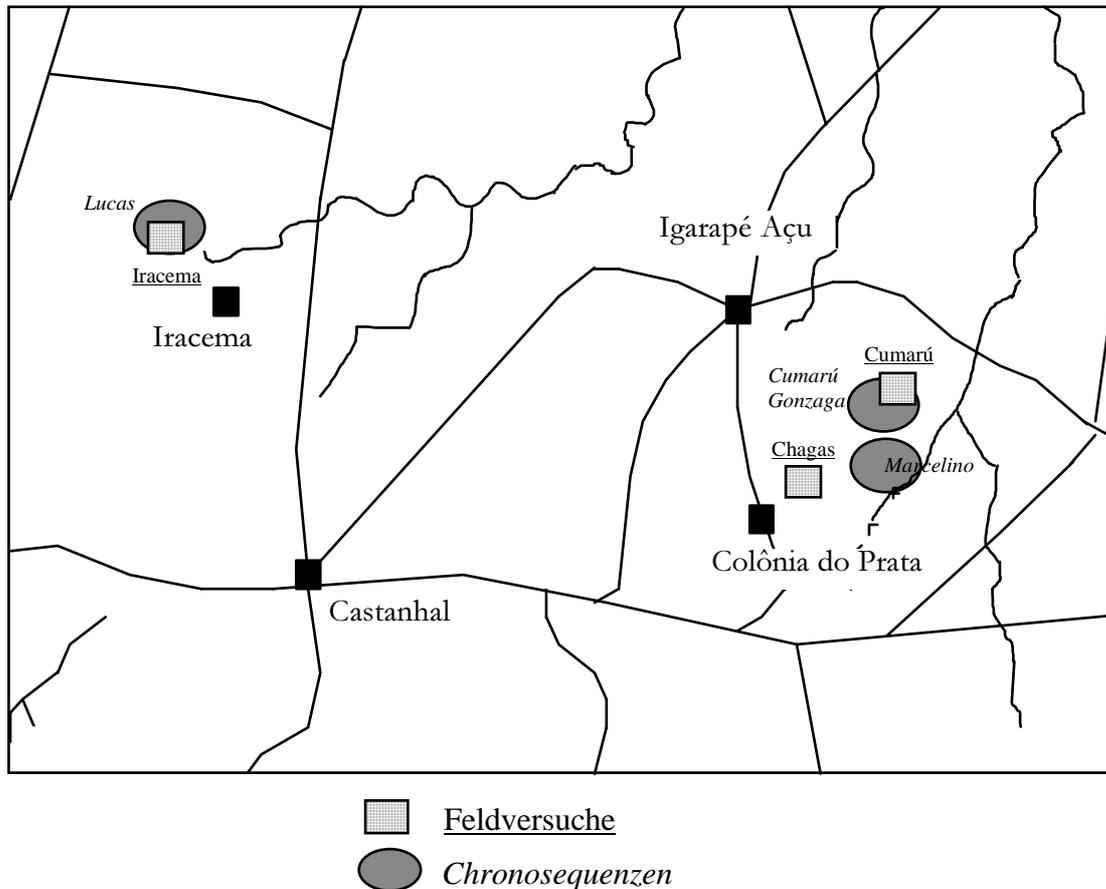


Abbildung 1 a) Übersichtskarte der Zona Bragantina
b) Detailkarte mit den Untersuchungsstandorten

1.2 Landnutzung

Das traditionelle Anbausystem

Das traditionelle landwirtschaftliche Nutzungssystem ist durch den Wechsel von Anbau- und Brachephase charakterisiert. Die Brachevegetation ('capoeira'), eine spontan aufwachsende Sekundärvegetation, wird während der Trockenzeit (September - Dezember) von den Bauern abgeschlagen und, sobald das Pflanzenmaterial trocken ist, gebrannt. Wenn die ersten ausdauernden Regenfälle niedergegangen sind, was im Januar der Fall ist, werden die Anbauflächen in Kultur genommen.

Im allgemeinen beträgt die Dauer der Anbauphase zwei Jahre, in denen Mais (*Zea mays*), Bohnen (*Vigna unguiculata*) und Maniok (*Manihot esculenta*) für den Eigenbedarf angebaut werden. Die Maissaat erfolgt im Januar, das Pflanzen des Maniok nur wenige Wochen später, *Vigna* wird erst nach der Maisernte gelegt. Der Maniok stellt die wichtigste Einnahmequelle

einer Familie dar, wenn er zur sog. *farinha de mandioca* (Maniokgrieß) verarbeitet und verkauft wird. Verspricht der Boden gute Erträge, wofür eine "kräftige" und "reife" Brachevegetation für den Bauern ein Indiz ist, so wird auch Reis (*Oryza sativa*) gepflanzt, sei es in Monokultur oder in Mischkultur mit Mais.

Der Bauer düngt, wenn er es sich leisten kann. Häufig verwendet wird ein handelsüblicher NPK-Dünger der Formulierung '10-28-20', der in geringer Dosierung ausgebracht wird: die Empfehlung der örtlichen landwirtschaftlichen Beratungsstelle (UEPAE Belém) lautet, den Deckel einer Coca-Cola-Flasche als Leermaß zu verwenden und eine entsprechende Düngermenge an jede einzelne Maispflanze zu streuen. Auf den Hektar hochgerechnet entspricht dieses einer Düngermenge von ca. 100 kg. Auch Bohnen werden in der Regel gedüngt, wobei die Dosierung sehr variieren kann.

Bereits ein halbes Jahr vor der Maniokernte wird nicht mehr gehackt, so daß die Sukzession der Brachevegetation bereits vor dem Ende der Anbauphase einsetzt. Die Brachedauer ist sehr unterschiedlich - sie lag im Untersuchungszeitraum zwischen 4 und 10 Jahren - und hängt immer mehr davon ab, ob der Kleinbauer alternative Flächen für die Inkulturnahme zur Auswahl hat oder nicht.

Semipermanenter Anbau

Primär zur Erwirtschaftung monetären Einkommens dient der Anbau semipermanenter Kulturen wie Maracuja (*Passiflora edulis*), Pfeffer (*Piper nigrum*), Apfelsinen (*Citrus sinensis*) und Ölpalmen. Urucú (*Bixa orellana*) wird zur Gewinnung von Carotin angebaut, seine wirtschaftliche Bedeutung ist jedoch stark rückläufig. Ölpalmen werden vorwiegend von Mittel- und Großagrariern angebaut und vermarktet.

Die Anlage von semipermanenter Kulturen erfordert einen hohen Investitionsaufwand, der nur von relativ wenigen Kleinbauern erbracht werden kann. Hinzu kommt, daß die Verkaufserlöse in besonders starkem Maße marktabhängig sind, wodurch das wirtschaftliche Risiko hoch ist.

Ausschließlich zur Ergänzung des familiären Speiseplans dient der Anbau einer Vielzahl fruchttragender Bäume und Sträucher sowie von Kräutern im Hausgarten. Dort findet man Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), Muruci (*Byrsonima crassifolia*), Cashew (*Anacardium occidentale*) und Bananen (*Musa x paradisiaca*), um nur einige zu nennen.

1.3 Boden

Die 'terra-firme'-Böden der Zona Bragantina entwickelten sich vorwiegend aus kontinentalen Süßwassersedimenten des Tertiärs und Quartärs. Sie sind Verwitterungsprodukte aus Granit,

Gneis und Sandstein des guyanischen und brasilianischen Schildes, die während des Pliozän und Pleistozän abgelagert wurden (in Anlehnung an DENICH 1989).

Die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Böden wurden in der Vergangenheit nach der brasilianischen Taxonomie vorwiegend als Latossolos amarelos bezeichnet, in neueren Publikationen werden sie den Podzólicos zugeordnet. REGO et al. (1993) klassifizierten diese Böden als typic Kandudult, also als Ultisole.

Klassifiziert man die Böden der Standorte Cumarú und Iracema nach der Textur, so kann man beide als lehmige Sandböden bezeichnen, wobei der Boden in Iracema aufgrund des geringeren Sand- und des höheren Schluffanteils schon zum sandigen Lehm tendiert (SMSS 1990). Wesentlich aussagekräftiger dürfte jedoch die Differenzierung der Sandfraktion in Grobsand (2-0,2 mm) und Feinsand (0,2-0,05 mm) sein (Tabelle 1). Die Anteile von Grob- und Feinsand liegen im Boden (0-20 cm Bodentiefe) des Standortes Iracema mit 42 bzw. 40 % im Verhältnis 1:1 vor, im Boden des Standortes Cumarú mit 60 bzw. 22 % im Verhältnis 3:1. Die Sandfraktion in Iracema weist also einen wesentlich höheren Feinsandanteil auf als in Cumarú. Der Standort Chagas hat einen Grobsandanteil von 55 % und einen Feinsandanteil von 27 %, liegt also mit einem Verhältnis von 2:1 zwischen den beiden anderen Standorten. Die Fraktionsgrenzen basieren auf der amerikanischen Nomenklatur, sind also nicht identisch mit der deutschen Einteilung.

Tabelle 1 Bodentextur an den Versuchsstandorten Cumarú, Iracema und Chagas in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm

	Grobsand 2-0,2 mm (%)	Feinsand 0,2-0,05 mm (%)	Sand (Grob- + Feinsand) (%)	Schluff 0,05-0,002 mm (%)	Ton < 0,002mm (%)
Cumarú					
0-10 cm	66	21	87	4	10
10-20 cm	57	24	81	4	15
Iracema					
0-10 cm	45	39	84	6	10
10-20 cm	38	41	79	8	13
Chagas					
0-10 cm	59	26	85	6	9
10-20 cm	51	28	79	5	17

Die chemische Charakterisierung der Böden zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Untersuchungsgebieten Igarapé Açu (Cumarú) und Castanhal (Iracema) (Tabelle 2). Der Standort Iracema zeichnet sich durch einen deutlich niedrigeren pH, höhere Al^{3+} - und H^+ -Konzentrationen sowie eine geringere Summe an austauschbaren Kationen aus, was vorrangig durch einen niedrigen Calciumgehalt bedingt ist. Der C_{org} -Gehalt ist in 0-10 cm Bodentiefe höher, was u.U. auf die größere Phytomasse der Brachevegetation zurückzuführen ist (24,4 t ha^{-1} in Iracema, 18,2 t ha^{-1} in Cumarú).

Tabelle 2 Chemische Bodencharakteristika einer 4-jährigen Brachevegetation an den Standorten Igarapé Açu (Cumarú) und Castanhal (Iracema) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm

	Igarapé Açu		Castanhal	
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm
pH(H_2O)	6,17	5,27	5,51	5,40
pH(CaCl_2)	4,73	4,05	4,37	4,11
C_{org} (g kg^{-1})	9,8	7,2	12,2	6,6
N_t (g kg^{-1})	1,03	0,86	1,10	0,74
C/N	9,6	8,4	11,1	9,0
P_i (NC) (mg kg^{-1})	2,7	2,6	2,0	1,9
P_t (g kg^{-1})	0,013	0,011	0,010	0,010
Ca^{2+} (cmol(+) kg^{-1})	1,60	-	1,20	-
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (cmol(+) kg^{-1})	2,10	0,57	1,64	0,46
Mg^{2+} (cmol(+) kg^{-1})	0,50	-	0,44	-
K^+ (cmol(+) kg^{-1})	0,054	0,033	0,050	0,039
Na^+ (cmol(+) kg^{-1})	0,031	0,026	0,037	0,033
Al^{3+} (cmol(+) kg^{-1})	0,00	0,37	0,13	0,77
H^+ (cmol(+) kg^{-1})	2,04	2,20	2,86	2,30
aK (cmol(+) kg^{-1})	2,19	0,63	1,73	0,53
KAK (cmol(+) kg^{-1})	4,23	3,20	4,72	3,60
Basensättigung (%)	52	20	36	15

1.4 Klima

Die Niederschlagsmenge in Cumarú lag im Untersuchungsjahr 1993 mit 2304 mm geringfügig unter dem langjährigen Mittel von 2485 mm (FCAP, zit. in HÖLSCHER 1995). In Iracema fielen von März 93 - Februar 94 3275 mm Niederschlag, was vor allem darauf zurückzuführen ist, daß der Januar mit 604 mm extrem regenreich war.

Die mittlere Lufttemperatur betrug nach HÖLSCHER (1995) während des Untersuchungszeitraums 25,1 °C und blieb im Jahresverlauf relativ konstant. Das mittlere tägliche Minimum und mittlere tägliche Maximum wurden mit 21,2 bzw. 30,8 °C gemessen.

2 Forschungsansatz und methodische Vorgehensweise

Der Forschungsansatz stützt sich auf die folgende Prämisse:

Je länger die Brachedauer, d.h. je extensiver die Nutzung, umso größer ist die potentielle Produktivität und die Nachhaltigkeit des Nutzungssystems.

Hypothese:

Bodenparameter, die sich während der Brache verändern, sind potentielle Indikatoren für die Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Nutzungssystemen.

Zur Untersuchung der Brachephase wurden Flächen von Kleinbauern mit unterschiedlich alter Brachevegetationen beprobt ("falsche Zeitreihe") und auf biologische Aktivitäten und chemische Parameter hin analysiert. Das so gewonnene Datenmaterial diente (a) dazu zu prüfen, ob ein Parameter eine Abhängigkeit von der Brachedauer zeigt und wenn ja (b) wie und in welcher Weise sich die Veränderung im Verlauf der Brachephase darstellt. Es handelt sich also einerseits um die Identifizierung von Bodenparametern, die für die Bodenfruchtbarkeit eine potentielle Bedeutung haben, und andererseits um deren "Kalibrierung", mit deren Hilfe das Ausmaß der Veränderungen während der Anbauphase beurteilt werden kann.

Im Mittelpunkt der Untersuchung der Kulturphase stand das Anbausystem mit Mais und Maniok in Mischkultur. Dieses wird im folgenden als das "traditionelle Anbausystem" bezeichnet, obwohl genau genommen andere traditionelle Varianten, wie z.B. mit Bohnen, existieren.

Dieses Anbausystem wurde mit Hilfe eines relativ engen Beprobungsschemas beprobt, um den Effekt der landwirtschaftlichen Aktivitäten, wie Brennen, Düngung und Ernte, auf die bei der Untersuchung der Brachephase identifizierten Parameter zu quantifizieren.

Zum Vergleich wurden modifizierte Anbausysteme angelegt, um (a) zu untersuchen, ob durch einfache Kulturmaßnahmen der Verlust an Bodenproduktivität während der Anbauphase verringert werden kann und (b) welchen Effekt eine mechanisierte Bodenbearbeitung mit Stockrodung, Pflügen und Eggen hat, die langfristig zu einer Eliminierung der holzigen Brachevegetation führt.

Für die genannten Untersuchungen wurden 3 Feldversuche an zwei verschiedenen Standorten angelegt.

3 Feldmethoden

3.1 Chronosequenzen

Bei der Untersuchung von Chronosequenzen der Brache wurde mit der Methodik der "falschen Zeitreihe" ('unreal time-series') gearbeitet. Hierbei werden Flächen unterschiedlichen Alters so behandelt, als wäre ein und dieselbe Fläche mehrmals über einen langen Zeitraum beprobt worden. Alle erfaßten Bodenunterschiede werden folglich alleinig dem Faktor "Zeit" (hier = unterschiedliche Altersstufen der Brachevegetationen) zugeschrieben. Diese Methode setzt voraus, daß bei der Flächenauswahl Nuclei mit homogenen Standortbedingungen gebildet werden, die alle zu untersuchenden Phasen des Nutzungssystems umfassen. Letztendlich war diese Forderung entscheidend bei der Zusammenstellung und Auswahl der Nuclei. Auswahlbedingungen wie der Ähnlichkeit in Regendichte und -verteilung sowie pedologischer Charakteristika, wurde dadurch Rechnung getragen, daß jeder Nucleus räumlich möglichst klein war. Was die Nutzungsvorgeschichte anbelangt, so wurde gefordert, daß allen Bracheflächen der traditionelle Anbau von Mais und Maniok vorangegangen sein sollte (was jedoch nicht immer möglich war). Zur Nutzungsvorgeschichte sind Interviews mit den Bauern geführt worden (siehe Anhang 1).

Es wurden 4 Chronosequenzen untersucht, im folgenden *Marcelino*, *Cumarú*, *Gonzaga* und *Lucas* genannt.

Chronosequenz *Marcelino*

Flächen: Bracheflächen mit Sekundärvegetation der Altersstufen 0 Jahre (Maniokanbau zu Beginn der Regeneration der Sekundärvegetation), 2 und 7 Jahre, eine intensiv mechanisch bearbeitete, vergraste Fläche, die seit einem halben Jahr brach lag, ein ca. 40 Jahre alter, durch Holzeinschlag genutzter Primärwald (oder Sekundärwald, der vor langer Zeit geschlagen und gebrannt worden ist), eine 4-jährige Pfefferplantage

Zielsetzung: Vorrangiges Ziel war es zu überprüfen, welche der biologischen Parameter in ausreichendem Maße Unterschiede zwischen den Brachephase und in den unterschiedlichen Nutzungssystemen zeigen. Die mechanisch bearbeitete Fläche, der 40-jährige Wald sowie die Pfefferplantage sind nicht Bestandteil des traditionellen Anbausystems. Sie wurden mituntersucht, um die Empfindlichkeit der biologischen Parameter auf unterschiedliche Formen der Landnutzung sowie die Nutzungsintensität zu testen. Die Auswahl der Bracheflächen des traditionellen Anbaus orientierte sich vor allem daran, auf welchen Flächen Lysimeter installiert worden waren (HÖLSCHER 1995).

Ort: Flächen von Sr. Marcelino und Sr. Francisco (Pfefferplantage, *Piper nigrum*), Igarapé Açu, Ramal do Prata.

Zeitpunkt der Probenahme: 24.9., 28.9. und 12.10.1992

Die Maniokfläche wurde zweimal, und zwar Ende September und am 12.10. 92, beprobt. Die Unterschiede der Analyseergebnisse dienten als Basis für eine Korrektur der enzymatischen Aktivitäten der am 12.10. beprobten Flächen.

Probenahmeschema: 12 Einstiche mit einem Pürkhauer Bohrer (Durchmesser: 22 mm; mit einem Hammer eingeschlagen) wurden zu einer Mischprobe (= Wiederholung) vereinigt; pro Fläche wurden 3 Wiederholungen gezogen, die sich an verschiedenen Orten auf der jeweiligen Fläche befanden (Abstand ca. 10 m).

Bodentiefen: 0-10 und 10-20 cm

Chronosequenz *Cumarú*

Flächen: Bracheflächen mit Sekundärvegetation der Altersstufen 0 Jahre (6 Monate alte Maniokfläche zu Beginn der Regeneration der Brachevegetation), 1 Jahr, 4 Jahre, ca. 15 Jahre und ca. 30 Jahre. Die 4-jährige Brachefläche ist identisch mit Behandlung 1 im Feldversuch Cumarú.

Zielsetzung: Die Chronosequenz *Cumarú* diente der Wiederholung der in der ersten Chronosequenz durchgeführten Untersuchungen an einem anderen Standort. Die Probenahme wurde auf 3 Tiefenstufen erweitert, deren Abstufung zudem verändert.

Ziel war es neben den Veränderungen in ein und derselben Tiefenstufe, auch vertikale Verlagerungen während des Wachstums der Sekundärvegetation zu erfassen.

Ort und Datum: Flächen des Sr. Gonzaga und Sr. Amauri (30-j. Brache), Igarapé Açu, Travessa Cumarú am 27.08.93.

Probenahmeschema: 50 Einstiche (Pürkhauer, s.o.) für die Bodentiefe 0-5 cm, 20 Einstiche für 5-20 cm und 10 Einstiche für die Bodentiefe 20-50 cm wurden jeweils zu einer Mischprobe vereinigt; pro Fläche wurden 4 Wiederholungen gezogen, die sich an verschiedenen Orten auf der jeweiligen Fläche befanden. Die Beprobung der Streuauflage wurde von Hand nach demselben Schema wie bei der Bodenprobenahme vorgenommen.

Bodentiefen: Auflagehorizont (Streu), 0-5, 5-20, 20-50 cm

Chronosequenz *Gonzaga* und *Lucas*

Flächen: Dieser Zyklus wurde an 2 Standorten untersucht und beinhaltet jeweils eine 6 Monate, eine 5 Jahre und eine 8 Jahre alte Brache. Die ersten beiden Flächen entsprechen den Behandlungen 2 und 1 der Feldversuche Cumarú und Iracema. Zudem wurde je eine Fläche in semipermanenter Nutzung untersucht: in Cumarú eine 6-j. Plantage mit Maracuja (*Passiflora edulis*), in Iracema eine aufgegebene 4-j. Plantage mit Papaya (*Carica papaya*), Kürbis und Melone (*Curcubitaceae*) auf der Mais (*Zea mays*) gesät worden war (siehe Anhang 1c). Alle Flächen liegen auf dem Land des Sr. Gonzaga (Cumarú; Ausnahme: die 8-j. Brache ist im Besitz eines Nachbarn) bzw. des Sr. Lucas (Iracema).

Zielsetzung: Der hier gewählte Ansatz ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Anbauvarianten (vgl. 3.2.1) mit dem traditionellen Anbausystem. So ist es möglich, darüber zu urteilen, ob die Eingriffe in das Anbausystem einen langfristigen Effekt auf die Regeneration der Bodenproduktivität haben. Darüber hinaus ist ein Vergleich der Standorte Cumarú und Iracema möglich.

Ort und Datum:

Gonzaga: Igarapé Açu, Travessa Cumarú, in der Nähe des Feldversuches Cumarú
Die Probenahme erfolgte am 21.2.1994

Lucas: Iracema, in der Nähe des Feldversuches Iracema (siehe Abbildung 1)
Die Probenahme erfolgte am 19. und 20.2.94.

Probenahmeschema: 15 (3 x 5) - 16 (2 x 8) Einstiche (Pürkhauer) pro Wiederholung (im Feldversuch = Parzelle) wurden zu einer Mischprobe vereint, 7 Wiederholungen

Bodentiefen: 0-10 und 10-20 cm

3.2 Feldversuche

Es wurden zwei unterschiedliche Feldversuche angelegt, die Versuche von 'Cumarú/Iracema' und 'Chagas'. Der Versuch von 'Cumarú' wurde am Standort Iracema wiederholt, um dieselben Behandlungen unter veränderten Bedingungen (Klima, Boden, Vegetation) zu untersuchen. Der Versuch 'Chagas' liegt in derselben Region wie 'Cumarú', hat jedoch - mit Ausnahme des einjährigen traditionellen Anbaus (Kontrolle) - andere Behandlungen.

Das Experiment in Cumarú ist besonders intensiv beprobt worden um den direkten Effekt der landwirtschaftlichen Aktivitäten, wie z.B. der Bodenvorbereitung, des Schlagens und Brennens, der Aussaat, Düngung und Ernte, auf bodenbiologische und -chemische Parameter studieren und quantifizieren zu können. Die Ergebnisse dieser detaillierten Untersuchung sollen als Grundlage dazu dienen, die Resultate der in einer Art Momentaufnahme beprobten Flächen von Iracema und Chagas interpretieren zu können. Im Versuch von Cumarú/Iracema wurde die intakte Ausgangsvegetation (zum Zeitpunkt des Schlagens ca. 3 Jahre alt) als absolute Referenz (Behandlung 1) stehengelassen (s. Abbildung 2).

3.2.1 Der 'Cumarú'/'Iracema'-Versuch

Orte:

Der Feldversuch Cumarú wurde auf dem Land des Sr. Gonzaga, Travessa Cumarú, Igarapé Açu angelegt, der Feldversuch in Iracema auf dem Land des Sr. Lucas, im Munizip Castanhal (s. Abbildung 1).

Die Nutzungsgeschichte des Standortes Cumarú entspricht der der 4-jährigen Brachefläche der Chronosequenz *Cumarú* (siehe Anhang 1). Zu Iracema liegen keine Informationen zur Nutzungsgeschichte vor. Es ist lediglich bekannt, daß im Jahr vor der Installation des Versuches Mais und Maniok angebaut worden waren.

Die Gesamtphytomasse der Brachevegetation (oberirdische Phytomasse + Streu) betrug in Cumarú vor dem Kahlschlagen im Mittel $18,2 \text{ t ha}^{-1}$ ($10,3\text{-}42,4 \text{ t ha}^{-1}$), in Iracema $24,4 \text{ t ha}^{-1}$ ($10,8\text{-}59,0 \text{ t ha}^{-1}$). Der Anteil nicht verbrannter Zweige und Äste belief sich in Cumarú auf 498 kg ha^{-1} ($70\text{-}1565$), in Iracema auf 757 kg ha^{-1} ($132\text{-}2752$). Die nach dem Brand anfallenden Aschemengen betragen in Cumarú 811 kg ha^{-1} ($517\text{-}1143$), in Iracema 788 kg ha^{-1} ($184\text{-}1804$). Sie waren also trotz der größeren Phytomasse der Brachevegetation in Iracema praktisch gleich hoch.



Abbildung 2 Luftaufnahme des Feldversuches in Cumarú, Dezember 1993
Deutlich sichtbar ist die in jedem Block als Referenz stehengelassene
Ausgangsvegetation (Behandlung 1)

Design: (Plan siehe Anhang 2a und 2b)

Das Versuchsdesign ist ein Lateinisches Quadrat mit 7 Behandlungen und 7 Wiederholungen. Die Größe der Parzellen beträgt $8\text{ m} \cdot 12\text{ m}$, die Breite der Wege 2 m . Die Gesamtgröße des Versuches beträgt $68\text{ m} \cdot 96\text{ m}$ (6528 m^2).

Die Behandlungen an beiden Standorten (Tabelle 3) sind identisch, lediglich die Zufallsverteilung der Parzellen ist unterschiedlich.

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle der gesamte Versuch vorgestellt. Die Behandlungen 6 und 7 sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Sie sind nicht untersucht worden, da im vorliegenden Zeitraum keine Effekte erwartet wurden.

Tabelle 3 Behandlungen des Feldversuches 'Cumarú/'Iracema'

1 Sekundärvegetation

zum Zeitpunkt der Versuchsanlage ca. 3 Jahre alt (ohne jeglichen Eingriff)

2 traditioneller Anbau

manuelles Schlagen der Brachevegetation + **Brennen** der Brachevegetation + Anbau 1

Anbau 1: Mais¹ - Maniok² in traditioneller Mischkultur, mit einer geringen Düngergabe (100 kg ha^{-1} eines NPK-Düngers der Formulierung '10-28-20'), Dauer der Anbauphase **1 Jahr**

3 traditioneller Anbau

manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 2

Anbau 2: Mais-Bohnen³ - Maniok traditionell, Düngung wie bei Behandlung 2 + geringe Startdüngung für die Bohnen (40 kg ha^{-1} eines NPK-Düngers der Formulierung '10-28-20'), Dauer der Anbauphase **2 Jahre**

4 Anbau ohne Brennen

manuelles Schlagen + abgeschlagene Brachevegetation als Mulch liegengelassen (Äste mit einem Durchmesser $> 20 \text{ mm}$ wurden entfernt) + Anbau 1

5 Anbau mit Bodendecker

manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 1 + Bodendecker⁴

6 Anbau mit Anreicherung der Brachevegetation

manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 1 + Anreicherung der Brachevegetation mit einer baumartigen Leguminose⁵ (Pflanzenabstand $2 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}$)

7 Anbau mit Anreicherung der Brachevegetation

manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 1 + Anreicherung der Brachevegetation mit einer baumartigen Leguminose⁵ (Pflanzenabstand $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$)

¹ *Zea mays* L. Off., Gramineae

² *Manihot esculenta* Crantz (*M. utilissima* Pohl), Euphorbiaceae

³ *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (*V. sinensis* (L.) Savi ex Hassk.), Leguminosae

⁴ *Canavalia ensiformis* (L.) DC, Leguminosae ("Jackbohne", "Feijão de porco")

⁵ *Acacia auriculiformis* A.Cunn ex Benth., Leguminosae

Die Düngeempfehlung der EMBRAPA für Mais (Recomendações Básicas, EMBRAPA, UEPAE, Belém) beläuft sich auf 20 kg N ha^{-1} , $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$, $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ zur Aussaat sowie einer zusätzlichen Stickstoffgabe in Höhe von 40 kg ha^{-1} 40-45 Tage nach dem Auflaufen. Die in "Anbau 1" ausgebrachte Düngermenge entspricht einem Gesamteintrag an Stickstoff von 10 kg ha^{-1} , an Phosphor (P_2O_5) von 28 kg ha^{-1} und an Kalium (K_2O) von 20 kg ha^{-1} .

Die Pflanzdichte beträgt bei Mais $1 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}$ (je 3-4 Samen), bei Maniok $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$ (1 Steckholz), bei *Vigna unguiculata* $0,5 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m}$ (3-4 Samen) und bei *Canavalia ensiformis* $0,3 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$ (2 Samen).

Die verwendete Maissorte war 'BR-106' (s. Anhang 3a). Bei Maniok wurden von den Kleinbauern der Standorte selbst vermehrte Material verwendet; es handelte sich i.a. um Sortengemische. Der im Feldversuch Cumarú verwendete Maniok wurde "Maniva Inha" genannt, der in Iracema "Duquinha". Als *Vigna*-Sorte wurde 'BR-3' verwendet (s. Anhang 3b).

Tabelle 4 Anbauplan der Feldversuche 'Cumarú' und 'Iracema'

	Cumarú	Iracema
Abschlagen der Brachevegetation	28.-30.10.92	23., 26., 27.10.92
Brennen des getrockneten Pflanzenmaterials	24.11.92	7.12.93
Maissaat	20.1.93	26.1.93
Düngung	20.1.93	26.1.93
Ausdünnen Mais auf 2 Pflanzen	3.2.93	8.2.93
Nachsaat Mais	4.2.93	5.2.93
Maniokpflanzen (Behandlungen 2,4,5,6,7)	3.2.93	8.2.93
Maniokpflanzen (Behandlung 3)	18.5.93	19.5.93
Aussaats Bohnen und <i>Canavalia</i>	17.5.93	18.5.93
Pflanzen von <i>Acacia auriculiformis</i> (Beh. 6,7)	17.5.93	18.5.93
Düngung Bohnen (Behandlung 3)	17.5.93	18.5.93
Hacken	18.-20.1.93	21.-23.1.93
	1.-3.3.93	23.-25.2.
	8.-12.3.93	15.-19.3.
	17.3.93 (Striga)	31.5.-2.6.
	26.4.93 (Beh. 5,6,7)	5.8. (Beh. 3)
	11.-12.5.93	30.8.-1.9. (Beh. 3)
	21.-26.6.93	21.9. (Beh. 3)
	14.7.93 (Beh. 3,4,5)	16.12. (Beh. 3)
	3.-4.8.93 (Beh. 3)	
	16.-20.8.93	
	23.11.93 (Beh. 3)	
Umknicken der Maistriebe	5.5.93	6.5.93
Ernte Mais	17.5.93	24.5.93
Ernte Bohnen	3.8.93	4.8.93
Ernte Maniok (Behandlungen 2,4,5,6,7)	22.2.94	23.2.94
Ernte Maniok (Behandlung 3)	20.6.94	20.6.94
Pflanzenschutz	Malathion (60 ml /20 l Wasser) gegen Blatt- schneideameisen	dito

Tabelle 5 Schema der Bodenprobenahme im Feldversuch 'Cumarú'

Datum	Tage /Wochen nach dem Brennen	Behandlungen	Anzahl Einstiche pro Parzelle	Kommentar
24.11.1992	0	1 2 4	12	unmittelbar vor dem Brennen
30.11.1992	6 /1	2	12	kurze Zeit nach dem Brennen
21.12.1992	27 /4	1 2 4	12	nach den ersten leichten Regenfällen
11.02.1993	79 /11	1 2 4	12	nach dem Beginn der Regenzeit 3 Wochen nach Aussaat und Düngung des Mais
16.03.1993	112 /16	1 2 4	16	8 Wochen nach Maissaat männliche Maisblüte
07.05.1993	164 /23	1 2 3 4	16	15 Wochen nach Maissaat, kurz vor der Maisernte vor der Aussaat von <i>Vigna</i> (Behandlung 3)
30.07.1993	248 /35	1 2 3 4 5	24	unmittelbar vor der <i>Vigna</i> -Ernte (Behandlung 3) während der vegetativen Entwicklung des Bodendeckers (Behandlung 5) Beginn der Sukzession der Brachevegetation
21.02.1994	454 /65	1 2 3 4 5	16	unmittelbar vor der Maniokernte (Behandlung 2,4,5,6,7)

Tabelle 6 Schema der Bodenprobenahme im Feldversuch 'Iracema'

Datum	Tage /Wochen nach dem Brennen	Behandlungen	Anzahl Einstiche pro Parzelle	Kommentar
4.12.1992	0	1 2 4	12	unmittelbar vor dem Brennen
8.12.1992	1 /0	2	12	kurz nach dem Brennen
26.1.1993	50 /7	1 2 4	12	nach dem Beginn der Regenzeit vor der Aussaat und Düngung des Mais
11.5.1993	155 /22	1 2 3 4	16	zum Zeitpunkt der Maisernte unmittelbar vor der Aussaat von <i>Vigna</i> in (Beh. 3)
2.8.1993	238 /34	1 2 3 4 5	24	unmittelbar vor der <i>Vigna</i> -Ernte in (Beh. 3) während der vegetativen Entwicklung des Bodendeckers (Behandlung 5) Beginn der Sukzession der Brachevegetation
19.2.1994	439 /63	1 2 3 4 5	16	unmittelbar vor der Maniokernte (Behandlung 2,4,5,6,7)

Im Feldversuch Iracema entsprachen die folgenden Parzellen nicht den in Tabelle 3 ausgewiesenen Behandlungen. In Parzelle D4, der vierten Wiederholung des Anbaus ohne Brennen (s. Anhang 2), wurde irrtümlicherweise das abgeschlagene und trockene Mulchmaterial verbrannt. Die Bodendaten dieser Wiederholung wurden aus den Datensätzen eliminiert. In die Parzellen E1 und G1 ist kurz nach der Installation des Versuches Feuer gelaufen, so daß die Vegetation unter Mitleidenschaft gezogen wurde. Da jedoch der Effekt auf die Bodeneigenschaften relativ gering war, sind die Daten dieser Parzellen in den Datensätzen verblieben.

3.2.2 Der 'Chagas'-Versuch

Ort: Fläche des Sr. Chagas, Ramal do Prata, Igarapé Açú

Tabelle 7 Behandlungen des Feldversuches 'Chagas'

-
- 1 **traditioneller Anbau** (entspricht Behandlung 2 in Cumarú und Iracema)
manuelles Schlagen der Brachevegetation + Brennen der Brachevegetation + Anbau 1
Anbau 1: **Mais-Maniok** in traditioneller Mischkultur, geringe Düngergabe
(100 kg ha⁻¹ eines NPK-Düngers der Formulierung '10-28-20'),
Dauer der Anbauphase 1 Jahr
 - 2 **Anbau mit erhöhter Düngergabe**
manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 1 mit erhöhter Düngergabe gegenüber
Behandlung 1. Düngergabe: 60 kg ha⁻¹ N (in zwei Gaben à 20 und 40 kg) als Urea,
60 kg ha⁻¹ P₂O₅ als TSP und 30 kg ha⁻¹ K₂O als KCl
 - 3 **Anbau mit Rohphosphatgabe**
manuelles Schlagen + Brennen + Anbau 1 mit einer zusätzlichen Rohphosphatgabe
(Herkunft: Acarajas/Brasilien); Düngung: 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ (Verdreifachung der P-
Gabe gegenüber Behandlung 2); Düngermengen von N (als Urea) und K (als KCl) wie
in Behandlung 1
 - 4 **Anbau mit manueller Stockrodung**
manuelles Schlagen + Brennen + manuelle Stockrodung + Anbau 1
 - 5 **Anbau mit manueller Stockrodung, Pflügen und Eggen**
manuelles Schlagen + Brennen + manuelle Stockrodung + Pflügen und Eggen
(Traktor) + Anbau 1
 - 6 **Anbau mit maschineller Stockrodung, Pflügen und Eggen**
manuelles Schlagen + Brennen + maschinelle Stockrodung + Pflügen und Eggen
(Traktor) + Anbau 1
-

Design: (Plan siehe Anhang 2c)

Das Versuchsdesign ist ein Lateinisches Quadrat mit 6 Behandlungen und 6 Wiederholungen. Die Größe der Parzellen beträgt 8 m · 15 m, die Breite der Wege zwischen den Parzellen der Blöcke A-G (bzw. zwischen den Blöcken I-VI) 2 m, zwischen den Blöcken A-G (bzw. zwischen den Parzellen der Blöcke I-VI) 3 m, die Gesamtgröße des Versuches beträgt 58 m · 105 m (6090 m²).

Tabelle 8 Anbauplan des Feldversuches 'Chagas'

Schlagen der Brachevegetation	14.-16.10., 19.10.92
Brennen des getrockneten Pflanzenmaterials	17.11.92
Stockrodung (Behandlung 4)	4.-7.12.92
mechanische Bodenvorbereitung	28.-30.12.92
Maissaat	19.1.93
Ausdünnen Mais	3.2.93
Düngung	18.1.93
2.Gabe der N-Düngung	22.3.93
Pflanzen des Maniok	2.2.93
Hacken	15.-18.3.93 18.-20.5.93 10.-13.8.93
Abknicken der Maistriebe	5.5.93
Ernte Mais	14.5.93
Ernte Maniok	21.2.94
Pflanzenschutz	-

Die Pflanzdichte beträgt bei Mais 1 m · 0,5 m (je 3-4 Samen) und bei Maniok 1 m · 1 m (1 Steckholz).

Die verwendete Maissorte war, wie in Cumarú und Iracema, 'BR-106' (s. Anhang 3a). Die Manioksorte "Olho verde" genannt stammte von dem Kleinbauern und war ein Gemisch aus ca. 4 Sorten.

Es erfolgte eine einmalige Bodenprobenahme am 3.6.1993, 3 Wochen nach der Maisernte (198 Tage bzw. 28 Wochen nach dem Brennen).

4 Labormethoden

4.1 Boden

4.1.1 Probenbehandlung

Die Bodenproben wurden am Tag der Probenahme ungekühlt, jedoch vor direkter Sonnenstrahlung geschützt, ins Labor gebracht. Die Lagerung erfolgte in einem Kühlraum bei einer Temperatur von ca. 4 °C. Am Tag darauf sind die aktuelle Bodenfeuchte sowie der pH-Wert bestimmt worden (4.1.3). Anschließend wurde mit dem Sieben begonnen, wozu ein Sieb der Maschengröße 2 mm verwendet wurde. War der Boden zu feucht, wurde er bei Raumtemperatur (25-28 °C) maximal 2 Tage lang vorgetrocknet.

Für die Bestimmung der enzymatischen Aktivitäten und der mikrobiellen Biomasse wurden die Proben in feldfeuchtem Zustand in PE-Flaschen (350 ml) gefüllt und im Kühlraum gelagert. Nach Beendigung der Analysen wurden die Bodenproben für die chemischen und physikalischen Untersuchungen an der Luft (23-28 °C) getrocknet.

4.1.2 Biologische Parameter

Bei der Charakterisierung biologischer Bodeneigenschaften wird oftmals die Empfehlung gegeben, gleichzeitig verschiedenen Ansätzen nachzugehen bzw. mehrere Analysemethoden anzuwenden, da jede für sich gesehen Schwachpunkte aufweist (SCHINNER et al. 1991; VANCE et al. 1987). Darüber hinaus bedarf die Interpretation der Ergebnisse der Kenntnis chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften.

Bei der Auswahl der bodenbiologischen Analysemethoden wurden solche Verfahren berücksichtigt, die sich einerseits als relativ empfindlich auf Veränderungen der Landnutzung erwiesen haben (siehe Kapitel II). Andererseits sollten die ausgewählten Parameter dazu beitragen, die

C-, N- und P-Dynamik im Boden zu charakterisieren, was für die Beurteilung von Nutzungssystemen von großer Bedeutung ist.

Alle biologischen Analysen wurden in der mikrobiologischen Abteilung des bodenkundlichen Labors am CPATU/EMRAPA in Belém durchgeführt.

4.1.2.1 Enzymatische Aktivitäten

Die untersuchten bodenenzymatischen Aktivitäten sind entsprechend der wichtigsten Bodenkreisläufe ausgewählt: Kohlenstoff (β -Glucosidase, Cellulase), Stickstoff (Ureasen), Phosphor (saure und basische Phosphatasen) sowie Schwefel (Aryl-Sulfatase). Ihre Bestimmung soll

Auskunft über das Ausmaß der metabolischen Vorgänge in den entsprechenden Kreisläufen geben. Die Aktivität der Dehydrogenase wird als ein Maß für die allgemeine mikrobielle Aktivität angesehen und korreliert i.a. gut mit der mikrobiellen Biomasse im Boden (DOMSCH et al. 1979).

Die Bestimmung der enzymatischen Aktivitäten basiert darauf, daß der Bodeneinwaage eine definierte Menge eines spezifischen Substrates zugesetzt wird, meist zusammen mit einer Pufferlösung. Anschließend wird bei einer bestimmten Temperatur eine definierte Zeit lang im inkubiert (Wasserbad). Die Messung der Farbintensität erfolgt fotometrisch (UNICAM 8625 - UV/VIS Spectrometer). Die Aktivität wird ausgedrückt als Menge des in einer definierten Zeit abgebauten Substrates.

Aufgrund der begrenzten Laborkapazitäten war es nicht möglich jede Feldwiederholung im Labor mehrfach zu analysieren. Um dennoch sichere Analyseergebnisse zu erzielen, wurden 10 % der Feldwiederholungen 3fach analysiert. War der Variationskoeffizient dieser Laborwiederholungen > 10 %, wurde der gesamte Analysedurchgang verworfen und wiederholt.

- **Saure und basische Phosphatase** ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

Methode nach TABATABAI & BREMNER (1969), EIVAZI & TABATABAI (1977, mod. SCHINNER et al. 1991).

Phosphatasen katalysieren die hydrolytische Spaltung von Phosphatestern. So sind sie an der Mineralisierung organischer P-Verbindungen beteiligt. Saure Phosphatasen können mikrobiellen Ursprungs sein oder von Pflanzenwurzel stammen, wobei mikrobielle Phosphatasen im Boden dominieren (SCHINNER et al. 1991). Basische Phosphatasen kommen dagegen wohl ausschließlich in Mikroorganismen und in tierischem Gewebe vor. Das Enzym ist induzierbar und wird bei geringer P-Verfügbarkeit verstärkt gebildet.

Bei der angewandten Analysemethode wird genau genommen die Aktivität der Phosphomonoesterase bestimmt. Die Methoden zur Bestimmung der sauren und der basischen Phosphatase unterscheiden sich ausschließlich in der Höhe des pH-Wertes der Pufferlösung. Dieser beträgt bei der sauren Phosphatase pH 6,5, bei der basischen Phosphatase pH 11. Als Substrat dient p-Nitrophenylphosphat-Dinatriumsalz-Hexahydrat (Merck 6850), aus dem p-Nitrophenol (p-NP) freigesetzt wird. Die Bodeneinwaage beträgt 1 g. Die Inkubation erfolgt eine Stunde lang bei einer Temperatur von 37 °C. Der Farbkomplex (gelb) wird fotometrisch bei 400 nm erfaßt.

- **Urease** ($\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)

Methode nach KANDELER & GERBER (1988)

Die Urease katalysiert die hydrolytische Spaltung von Harnstoff zu Kohlendioxid und Ammoniak: $(\text{NH}_2)_2 \text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$. NH_3 wird im Boden i.a. zu Ammonium umgebaut. Bei der Urease handelt es sich fast ausschließlich um ein zellfreies Enzym, das sowohl von Mikroorganismen als auch von Pflanzen synthetisiert und ausgeschieden wird.

Als Substrat für die Bestimmung der Urease-Aktivität dient Harnstoff. Boden (5 g) wird 2 h bei 40°C inkubiert und im Anschluß die Menge an freigesetztem Ammonium bestimmt. Die fotometrische Messung erfolgte bei 660 nm. Die Methode wurde ohne Verwendung einer Pufferlösung durchgeführt.

- **β -Glucosidase** ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)

Methode nach EIVAZI & TABATABAI 1988; TABATABAI 1982 (zit. in ALEF 1991)

Glucosidasen katalysieren die hydrolytische Spaltung verschiedener Glucoside, sie sind also am Abbau von Cellulose beteiligt.

Die Analyse basiert auf der Freisetzung von p-Nitrophenol (p-NP) aus dem Substrat p-Nitrophenyl- β -D-Glucosid [Merck 6793] während einstündiger Inkubation bei einer Temperatur von 37°C . Die Bodeneinwaage beträgt 1 g. Die Methode wurde ohne Verwendung von Toluol durchgeführt. Die fotometrische Messung erfolgte bei 400 nm.

- **Dehydrogenase** ($\mu\text{g INTF g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)

Methode nach MERSI & SCHINNER (1990, zit. in SCHINNER et al. 1991)

Dehydrogenasen bewirken die Oxidation organischer Verbindungen durch Abspaltung von zwei H^+ -Atomen (SCHINNER et al. 1991).

Als Substrat dient INT (2-p-Iodophenyl-3-nitrophenyl-5-phenyl-tetrazoliumchlorid; Sigma I-8377), welches während einer 2-stündigen Inkubation bei 40°C zu INT-Formazan reduziert wird. Nach Abschluß einer einstündigen Extraktion mit Hilfe von Dimethylformamid und Ethanol (im Dunkeln, da INT-Formazan lichtempfindlich ist!) erfolgt die Messung fotometrisch bei 464 nm.

- **Cellulase** (CM-Cellulase) ($\mu\text{g GLC g}^{-1} 24\text{h}^{-1}$)

Methode nach SCHINNER & Von MERSE (1990)

Die Cellulase bewirkt die Spaltung der Cellulose. Sie besteht aus mindestens drei Enzymen: den Endo- β -1,4-glucanasen, Exo- β -1,4-glucanasen sowie den β -Glucosidasen. Die wichtigsten Cellulosezerersetzer sind Pilze.

Da native Cellulose nicht wasserlöslich ist, wird die Carboxymethylcellulose als Substrat verwendet. Boden wird bei 50° C 24 Stunden lang inkubiert. In alkalischer Lösung kommt es zu einer Reduktion von K-Hexacyanoferrat-III, welches in saurer Lösung mit Fe-III-Ammoniumsulfat zu einem Fe-III-Hexacyanoferrat-Komplex reagiert. Dieser als "Berliner Blau" bezeichnete Farbkomplex wird bei 690 nm fotometrisch bestimmt. Die Aktivität wird in Glucose-Äquivalenten (GLC) angegeben.

- **Aryl-Sulfatase** ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)

Methode nach TABATABAI & BREMNER (1970, mod. SCHINNER et al. 1991)

Sulfatasen spielen bei der Mineralisierung schwefelhaltiger Verbindungen im Boden eine Rolle, dadurch, daß sie in der Lage sind, organische Sulfate hydolytisch zu spalten. Sulfatasen sind vorwiegend mikrobiellen Ursprungs.

Der am häufigsten untersuchte Sulfatasetyp ist die Aryl-Sulfatase. Zu einer Hemmung ihrer Aktivität kann es durch Anwesenheit von SO_4^{2-} S(IV) und S(VI) aber auch von PO_4^{3-} kommen (ALEF 1991). Ob ein Zusammenhang der Aryl-Sulfatase-Aktivität mit der Schwefelmineralisierung im Boden besteht, ist nicht geklärt.

Als Substrat für die Analyse dient Kalium-p-Nitrophenylsulfat [Merck 6831]. Das während einer einstündigen Inkubation bei 37° C abgespaltene Nitrophenol (NP) wird nach Anfärbung mit NaOH bei 420 nm fotometrisch gemessen.

4.1.2.2 Mikrobielle Biomasse

Es wurden ausschließlich Methoden berücksichtigt, die von DOMSCH et al. (1979) als "physiologische" Methoden bezeichnet werden. Methoden, die auf der direkten Beobachtung oder dem Anlegen von Kulturen zur Biomassebestimmung beruhen, müssen nach dem heutigen Stand des Wissenschaft als veraltet - weil ungenau - eingestuft werden (STEVENSON 1986).

- **Mikrobieller Biomasse-Kohlenstoff** (C_{mik})

Fumigations-Extraktions-Methode

Methode nach SPARLING & WEST (1988)

"Ninhydrin-reactive-nitrogen method"

Methode nach JÖRGENSEN & BROOKES (1990)

Boden wird zur Abtötung der Mikroorganismenpopulation 24 Stunden lang mit Chloroform (CHCl_3) begast. Die Extraktion erfolgt mit einer 0,5 M K_2SO_4 -Lösung. Die Differenz des C_{org} -Gehaltes von begasten und nicht-begasten Proben entspricht proportional dem C_{mik} -Gehalt des Bodens. Zur Erfassung des Kohlenstoffes mikrobiellen Ursprungs wurde der Anteil ninhydrin-reaktiven Stickstoffes bestimmt. Die Messung erfolgt fotometrisch bei 570 nm. Als Konversionsfaktor zur Berechnung des C_{mik} -Gehaltes wurde 22 statt 20,6 verwendet (JÖRGENSEN 1994).

- **Mikrobieller Biomasse-Phosphor** (P_{mik})

Fumigations-Extraktions-Methode

Methode nach BROOKES et al. (1982) und OLSEN & SOMMERS (1982)

Das Prinzip dieser Analysemethode ist wie bei der Bestimmung des mikrobiellen Biomasse-C. Die Extraktion von anorganischem P erfolgt mit einer 0,5 M NaHCO_3 -Lösung (pH 8,5). Da es während der Inkubation und der Extraktion zu Verlusten von freigesetztem Phosphor durch eine P-Fixierung kommen kann, wird die Fixierungsrate des Bodens bestimmt und ein Korrekturfaktor errechnet.

4.1.2.3 Mikrobielle Respiration

Zur Bestimmung der mikrobiellen Bodenatmung wurden zwei Labormethoden verwendet.

- **Basale Respiration** (CO_2)

Methode nach ISERMEYER (1952, mod. JÄGGI 1976)

Bodenproben (20 g) werden 24 Stunden lang im feldfeuchten Zustand bei Raumtemperatur (im Idealfall 25° C) inkubiert und das entweichende CO_2 in Natronlauge (0,05 M) absorbiert. Die CO_2 -Freisetzung wird errechnet nach Rücktitration der unverbrauchten Lauge mit 0,1 M HCl (Indikator: Phenolphthalein).

- **Substrat-induzierte Respiration** (CO₂i)

Methode nach ANDERSON & DOMSCH (1978), mod. nach der Isermeyer-Methode (ISERMEYER 1952, mod. JÄGGI 1976)

Das Prinzip dieser Analysemethode ist wie bei der Bestimmung der basalen Respiration. Der Unterschied besteht darin, daß dem Boden Glucose (in Aqua dest. gelöst) zugesetzt wird und die Inkubationsdauer lediglich 4 Stunden beträgt.

4.1.3 Chemische Parameter

Die Bodenproben wurden in vier verschiedenen Labors chemisch analysiert: im Labor der Bodenmikrobiologie des CPATU in Belém, im Labor des SNLCS in Rio de Janeiro und in den Laboren des IBW und IAT in Göttingen.

CPATU, Belém (eigene Analysen)

Analysen, die im bodenkundlichen Labor der EMRAPA, Belém, durchgeführt wurden.

- **pH-Wert** (pH(H₂O), pH(CaCl₂))

Extraktion (a) mit destilliertem Wasser bzw. (b) mit 0,01 M CaCl₂-Lösung. Der Einwaage von 10 g Boden wurden 25 ml Lösung zugesetzt. Die Messung erfolgte nach 2 Stunden mit Hilfe eines pH-Meters.

- **extrahierbarer Phosphor** (P_i(OL)) (mg kg⁻¹) nach WATANABE & OLSEN (1965)

Extraktion mit 0,5 M NaHCO₃-Lösung und kolorimetrischer Messung

- **austauschbares Ammonium** (NH₄⁺) (mg kg⁻¹) (KANDELER & GERBER 1988)

Extraktion mit KCl-Lösung (2 M) und kolorimetrischer Messung (die Farbbildung basiert auf einer modifizierten Berthelotschen Reaktion). Die Bestimmung der NH₄-Konzentration erfolgte im Zuge der Analyse der Urease-Aktivität unter Verwendung der Leerproben (ohne Substrat). Die Bodenproben (5 g) wurden folglich 2 h lang bei 40 °C inkubiert, was einen Anstieg des Analyseergebnisses zur Folge gehabt haben dürfte.

- **Nitrat** (NO₃⁻) (mg kg⁻¹) (SCHARPF 1977)

Extraktion mit KCl-Lösung (2 M) und fotometrische Messung im UV-Bereich (210 nm)
Genau genommen handelt es sich mineralisierbaren Stickstoff (N_{min}).

SNLCS, Rio de Janeiro

Analysen des "Serviço National de Levantamento e Conservação de Solos" (SNLCS), Rio de Janeiro (Brasilien). Die Methoden sind im "Manual de Métodos de Análise de Solo" beschrieben.

- **organischer Kohlenstoff** (C_{org}) (g kg^{-1})
Na₂Oxidation mit $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (0,4 N), Titration mit $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ (0,1 N), Indikator: Diphenylamin
- **Gesamt-Stickstoff** (N_t) (g kg^{-1}) (nach Kjeldahl)
- **Gesamt-Phosphor** (P_t) (g kg^{-1}) Extraktion mit H_2SO_4 (1:1), fotometrische Messung
- **extrahierbarer Phosphor** (P_i (NC)) (mg kg^{-1}) (North Carolina bzw. Mehlich 1-Extrakt)
Extraktion mit HCl (0,05 N) und H_2SO_4 (0,025 N), fotometrische Messung
Alle mit P_i bezeichneten Konzentrationen anorganischen Phosphors sind mit dieser Methode analysiert worden. Wurde die Olson-Methode angewendet, ist dieses ausdrücklich vermerkt (P_i (OL)).
- **austauschbares Calcium** (Ca^{2+}) und **Magnesium** (Mg^{2+}) ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)
Extraktion mit KCl (1 N) und Titration mit EDTA
- **austauschbares Kalium** (K^+) und **Natrium** (Na^+) ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)
Extraktion mit HCl (0,05 N) und H_2SO_4 (0,025 N)
- **austauschbares Aluminium** (Al^{3+}) ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)
Extraktion mit 1N KCl -Lösung, Titration mit 0,025 N NaOH -Lösung mit Azul-Bromotimol als Indikator
- **austauschbares Hydrogenium** (H^+) ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)
Extraktion von Al^{3+} und H^+ mittels 1 N Ca -Acetat-Lösung (pH 7), Titration mit 0,0606 N NaOH -Lösung mit Phenolphthalein (3 %-ig) als Indikator. Aus der Differenz dieser "austauschbaren Azidität" und dem austauschbaren Aluminium (s.o.) errechnet sich die Konzentration an austauschbarem H^+ .
- **austauschbare Kationen** ("aK") ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$): Summe aus $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$
- **Kationenaustauschkapazität** ("KAK") ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$)
Summe aus $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$
- **Basensättigung** (%): $(\text{aK} \cdot 100) / \text{KAK}$

IBW, Göttingen

Analysen des Zentrallabors am Institut für Bodenkunde und Waldernährung (IBW), Göttingen
Alle chemischen Analysen (Ausnahme pH-Wert) der Chronosequenz *Marcelino* (siehe III 3.1) sowie die 4-jährige Brache der Chronosequenz *Cumarú* für den Laborvergleich (s. 4.1.3.1) wurden im IBW durchgeführt.

Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, Al wurden mit einer 1N NH_4Cl -Lösung perkoliert und anschließend am Atomabsorptionsspektrometer (AAS) gemessen. C und N wurden am C/N-Elementaranalysator, P kolorimetrisch gemessen (HÖLSCHER 1995).

IAT, Göttingen

Analysen des Labors am Institut für tropischen Pflanzenbau (IAT), Göttingen

- **organischer Phosphor** (mg kg^{-1}) nach HEDLEY et al. (1992), mod. TIESSEN & MOIR (1993)

4.1.3.1 Labor-Vergleich

Der Großteil der Bodenanalysen erfolgte im Labor des "Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos" (SNLCS) in Rio de Janeiro (Brasilien). Obwohl dieses Labor eine gute Reputation aufweist, war eine Kontrolle der Analyseergebnisse unabdingbar. Zum Vergleich wurden einige Bodenproben einer 4-jährigen Brache fläche mit drei Bodentiefen im Zentral-labor am Institut für Bodenkunde und Waldernährung (IBW) der Universität Göttingen analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt; die Mittelwerte wurden aus 4 Feldwiederholungen berechnet. Es zeigt sich, daß bei der C-Analyse in Göttingen um 22 % höhere Konzentrationen gemessen werden als in Rio, bei N ist es umgekehrt (-25 %). Das führt dazu, daß das C/N-Verhältnis in der Tiefenstufe 0-5 cm in Rio 11,8 beträgt, in Göttingen 18,6. Ursache für die höheren C-Gehalte des IBW gegenüber dem SNLCS in Rio könnte sein, daß in Göttingen ein Autoanalyser zur Analyse verwendet wird. Die Veraschung erfolgt also durch Verbrennen der Bodenproben, wodurch u.U. Holzkohlepartikel miterfaßt werden und den C-Gehalt in die Höhe treiben. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der Veraschung in Rio um eine Naßveraschung mit Kaliumdichromat.

Sowohl bei Magnesium (in 0-5 cm Bodentiefe -27 %) als auch Kalium (-13 %) sind die in Göttingen gemessenen Konzentrationen niedriger als in Rio. Die Calciumgehalte (in 0-5 cm Bodentiefe) unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander, ebenso die Summe der austauschbaren basischen Kationen.

Tabelle 9 Vergleich von Ergebnissen aus Bodenanalysen der Labors des SNLCS in Rio de Janeiro, Brasilien, und des IBW in Göttingen einer 4-jährigen Brachefläche mit drei Tiefenstufen.

			Bodentiefe				Korrelationskoeffizient (n=12)
			0-5 cm	5-20 cm	20-50 cm	Mittel	
C _{org}	g kg ⁻¹	Rio	11,25	7,13	4,60	7,66	0,962***
		IBW	12,80	9,00	5,78	9,19	
N _t	g kg ⁻¹	Rio	0,95	0,75	0,58	0,76	0,715**
		IBW	0,70	0,68	0,35	0,60	
C/N		Rio	11,8	9,5	8,0	9,8	0,329 ns
		IBW	18,6	13,8	16,7	16,4	
Ca	cmol(+)kg ⁻¹	Rio	1,55	- ¹	- ¹		
		IBW	1,51	0,33	0,18		
Mg	cmol(+)kg ⁻¹	Rio	0,43	- ¹	- ¹		
		IBW	0,31	0,13	0,05		
Ca+Mg	cmol(+)kg ⁻¹	Rio	1,98	0,50	0,30	0,93	0,983***
		IBW	1,82	0,45	0,18	0,82	
K	cmol(+)kg ⁻¹	Rio	0,058	0,030	0,020	0,036	0,945***
		IBW	0,044	0,026	0,020	0,030	
aK	cmol(+)kg ⁻¹	Rio	2,08	0,57	0,35	1,00	0,999***
		IBW	2,01	0,60	0,38	1,00	

¹ bei Ca+Mg-Konzentrationen < 1 cmol(+) kg⁻¹ wurden die Ca- und Mg-Konzentrationen in Rio nicht mehr getrennt angegeben

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es nennenswerte Unterschiede zwischen den Analyseergebnissen bei den Absolutwerten beider Labors gibt. Die meist hoch signifikanten Korrelationskoeffizienten deuten jedoch darauf hin, daß die Vergleichbarkeit von im selben Labor analysierten Proben verschiedener Flächen und Anbausysteme dennoch gewährleistet ist. Die Analysen von austauschbarem Al³⁺ und H⁺ sind von den Konzentrationen her nicht vergleichbar, da die angewandten Methoden ganz unterschiedliche Fraktionen erfassen. Das gleiche gilt auch für die Natriumanalyse.

Der Vergleich der pH-Messungen des EMBRAPA-Labors mit denen des IBW zeigt unwesentlich höhere Meßwerte des Göttinger Labors (Tabelle 10).

Tabelle 10 Vergleich zwischen den pH-Messungen im Labor der EMBRAPA (eigene Analysen) in Belém, und denen des IBW, Göttingen.

Boden: eine 4-jährige Brachefläche mit drei Tiefenstufen. Mittelwerte aus 4 Feldwiederholungen.

	Labor	Bodentiefe			Mittel	Korrelations- koeffizient
		0-5 cm	5-20 cm	20-50 cm		
pH (H ₂ O)	Belém	5,82	5,27	5,25	5,45	0,985***
	IBW	5,90	5,39	5,40	5,56	
pH (CaCl ₂)	Belém	4,56	4,00	4,00	4,19	0,996***
	IBW	4,71	4,15	4,16	4,34	

4.1.4 Physikalische Parameter

Textur

Die Bestimmung erfolgte im Labor des "Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos" (SNLCS) in Rio de Janeiro, Brasilien. Die Analysemethode basiert auf der Dispergierung des Bodens mit 1 N Natronlauge und anschließender Sedimentation.

Die Kategorisierung in die verschiedenen Fraktionen beruht auf der amerikanischen *Soil Taxonomy* (SMSS 1990) und stimmt nicht vollends mit der deutschen Klassifizierung überein.

- Grobsand (2-0,2 mm) (%)
- Feinsand (0,2-0,05 mm) (%)
- Sand (total) (%)
- Schluff (0,05-0,002 mm) (%)
- Ton (< 0,002 mm) (%)

Bodenfeuchte

Die aktuelle Bodenfeuchte (% Trockensubstanz) wurde gravimetrisch durch 24-stündige Trocknung bei 105°C bestimmt.

4.2 Pflanzen

Gesamt-Phosphor (mg kg^{-1}) (IITA - Manual series No. 7)

Zur Analyse diente ein Autoanalyser II (Technicon). Der Aufschluß erfolgt mit konz. HClO_4 , konz. HNO_3 und 6 N HCl. Durch Anfärbung mit Ammoniumvanadat und Ammoniummolybdat kommt es zur Bildung eines Phosphomolybdovanadat-Komplexes. Dessen Färbung wird kolorimetrisch bei 420 nm bestimmt. Die Analyse erfolgte im IAT, Göttingen.

5 Agronomische Erhebungen

5.1 Ernte

Mais (*Zea mays*)

Bei der Maisernte wurde die gesamte Parzelle abgeerntet, wobei auf die beiden Randreihen sowie die jeweils erste und letzte Pflanze jeder Reihe verzichtet wurde. Hierdurch verringert sich die für die Berechnung relevante Parzellengröße auf $6 \text{ m} \cdot 11 \text{ m}$ (Cumarú/Iracema) bzw. $6 \text{ m} \cdot 14 \text{ m}$ (Chagas), was einer theoretischen Anzahl von 132 bzw. 156 Pflanzen entspricht. Die tatsächliche Pflanzenzahl lag in Cumarú im Mittel bei 92 (Spannweite: 74-102), in Iracema bei 101 (91-112) und in Chagas bei 116 (98-125).

Die erfaßten Kompartimente sind Stroh, Kolben, Körner und Spindel, wobei jeweils die Frisch- und Trockengewichte bestimmt wurden. Stroh und Kolben wurden unmittelbar nach der Ernte auf dem Feld gewogen, Körner und Spindel erst an den folgenden Tagen wenn nötig nachgetrocknet, voneinander getrennt und gewogen. Die Gesamtphytomasse wurde dagegen rein rechnerisch bestimmt: bei Mais ist sie gleich der Summe aus Strohgewicht und Kolben-ertrag.

Ferner wurde die Pflanzen- und Kolbenanzahl bestimmt. Die Erträge wurden nicht um die Anzahl eventuell fehlender Pflanzen bzw. Kolben korrigiert.

Maniok (*Manihot esculenta*)

Die Ernte wurde auf einer Subparzelle von $3 \text{ m} \cdot 8 \text{ m}$ durchgeführt (dieses entsprach im Normalfall 3 Reihen à 8 Pflanzen = 24 Pflanzen). Die tatsächliche Pflanzenzahl betrug im Mittel in Cumarú 20,6 (Spannweite: 16-24), in Iracema 22,6 (15-24) und in Chagas 23,2 (21-24).

Die erfaßten Kompartimente sind Knollen, Triebe (verholzter Teil) und Blätter (incl. grüner Teil der Triebe).

Geerntet wurden nur die Pflanzen, die auf der ausgewählten Subparzelle vorhanden waren. Deren Anzahl und die Knollenanzahl wurden bestimmt sowie das Frischgewicht (total) und das Trockengewicht aller Kompartimente (Unterprobe) ermittelt.

Die Probenahme bestand darin, daß eine (in Cumarú und Iracema) bzw. zwei (Chagas) repräsentative Pflanzen pro Parzelle vollständig, nach den Kompartimenten getrennt, aufbereitet (Trocknung und Mahlen) wurden. Für die Analyse wurde eine Unterprobe genommen.

Der Rest der Parzellen wurde i.a. innerhalb weniger Tage abgeerntet und der verwertbare Teil der *estacas* (Steckhölzer) in Absprache mit dem Bauern vom Feld abgetragen und gewogen.

Bohnen (*Vigna unguiculata*)

Wie bei der Maisernte wurde die gesamte Parzelle abgeerntet, wobei auf die beiden Randreihen sowie die jeweils erste und letzte Pflanze einer jeden Reihe verzichtet wurde. Hierdurch verringerte sich die für die Berechnung relevante Parzellengröße auf $6\text{ m} \cdot 11\text{ m}$ (Cumarú und Iracema), was im Optimalfall einer Pflanzenzahl von 532 entspricht. Die tatsächliche Pflanzenzahl betrug im Mittel in Cumarú 471 (443-501), in Iracema 407 (350-460).

Die Pflanzen wurden nach den Kompartimenten Stroh, Körner und Hülsen (jeweils Frisch- und Trockengewichte) getrennt, getrocknet, gewogen und gemahlen.

6 Klimatologische Erhebungen

6.1 Niederschlag

Niederschlagsdichte

Für die Versuche Cumarú und Iracema wurde der Niederschlag mit Hilfe von Regensammlern erfaßt, die in dreifacher Wiederholung auf dem Versuchsgelände installiert wurden. Für den Versuch Chagas wurden die Daten der automatischen meteorologischen Meßstation des SHIFT-Projektes (HÖLSCHER 1995) verwendet (Tabelle 11).

Der Jahresniederschlag betrug 1993 in Cumarú 2304 mm, in Iracema lag er von März - Dezember bei 2362 mm. Nimmt man die Monate Januar und Februar des Jahres 1994 als Maßstab, so wird die Jahressumme in Iracema bei mehr als 3000 mm liegen. Während der Maiskultur in Cumarú (20.1.-17.5.) fielen 1222 mm Niederschlag.

Tabelle 11 Monatssummen der Niederschläge (mm) während des Versuchszeitraumes in Cumarú¹ (Igarapé Açu) und Iracema (Castanhal)

	Cumarú	Iracema
Oktober 92	17,0	- ²
November 92	6,8	-
Dezember 92	32,7	-
Januar 93	261,8	-
Februar 93	259,4	-
März 93	267,6	391,2
April 93	444,6	350,7
Mai 93	200,6	277,0
Juni 93	148,9	241,0
Juli 93	130,8	247,8
August 93	69,0	215,2
September 93	101,0	77,1
Oktober 93	62,9	182,6
November 93	186,0	183,3
Dezember 93	171,8	195,8
Januar 94	373,2	604,4
Februar 94	238,4	308,6

¹ die Daten für die Regendichten der Monate Oktober 92 - Februar 93 stammen von der meteorologischen Meßstation des SHIFT-Projektes

² Regenmesser noch nicht installiert

Niederschlagsverteilung

Die Verteilungsmuster der Niederschläge sind an den Versuchstandorten Cumarú und Iracema durchaus ähnlich (Abbildung 3). Die Trockenzeit im Jahr 93/94 ist weniger deutlich, vergleicht man sie in Cumarú mit dem Jahr davor. Im Vergleich der beiden Standorte ist sie in Iracema weniger stark ausgeprägt als in Cumarú. Trotz scheinbar fortdauernder Regenfälle zum Jahreswechsel 1993/94 zeigte die Brachevegetation deutliche Wassermangelsymptome.

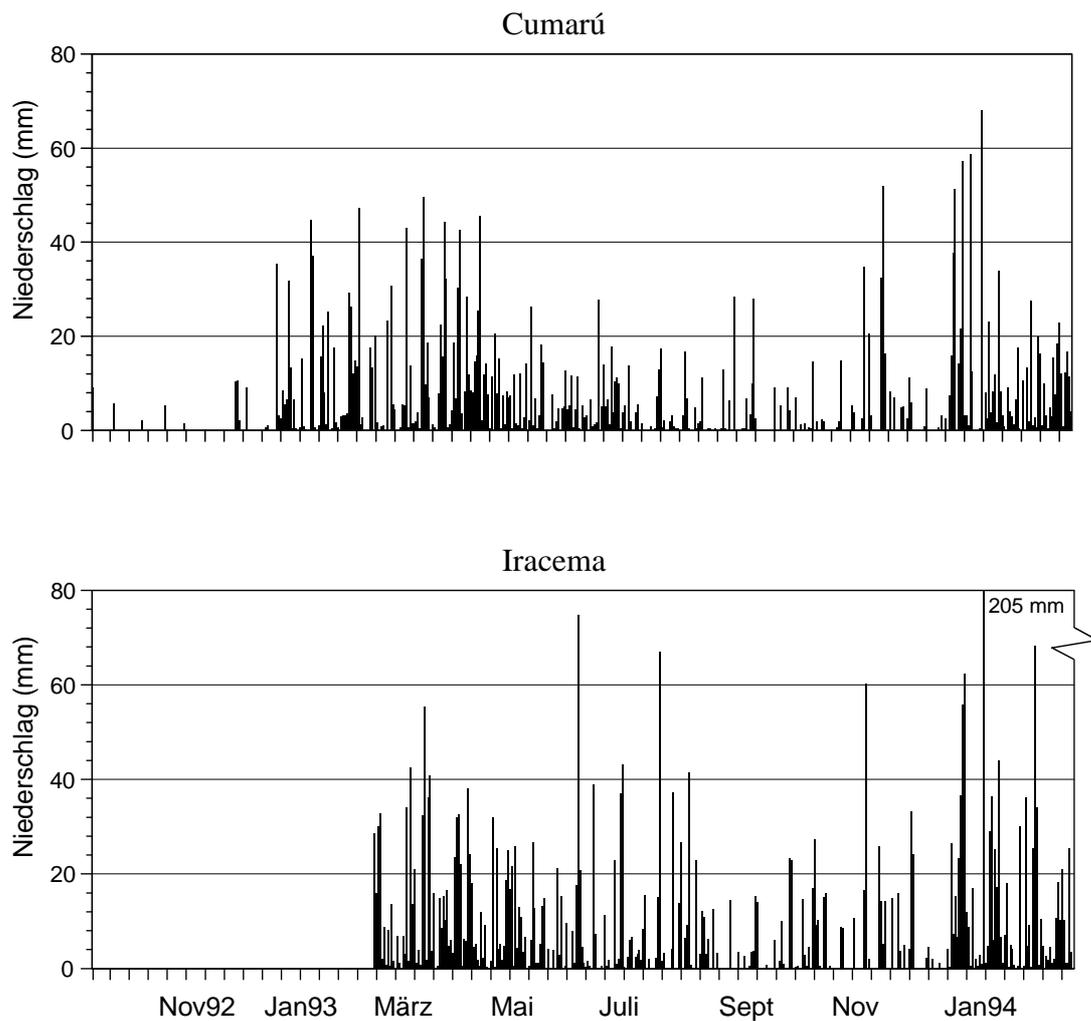


Abbildung 3 Niederschlagsverteilung an den beiden Versuchsstandorten Cumarú und Iracema von Oktober 92 bis Februar 94

Bemerkungen: in Iracema wurden von Oktober 92 - Februar 93 keine Messungen durchgeführt; am 12.1.94 fielen in Iracema 205 mm (!) Niederschlag, was in der Grafik nicht deutlich wird, da die Skalierung nur bis 80 mm reicht.

7 Statistische Auswertung

Bei der statistischen Auswertung der Daten wurden die Softwarepakete Statistica, Version 4.5, sowie StatGraphics, Version 5.5D, verwendet.

Die Prüfung auf Normalverteilung erfolgte mit dem Shapiro-Wilk- und dem Kolmogorov-Smirnov-Test.

Zur Beantwortung von Fragestellungen, die einzelne Variablen betrafen, sind Varianzanalysen mit Rangtest (Tukey-Test), der T-Test sowie Korrelations- und Regressionsanalysen berechnet worden. Bei der Verrechnung von Variablenpools wurden multiple Regressionen, Faktoren- und Diskriminanzanalyse durchgeführt.

Bei der tabellarischen Gegenüberstellung verschiedener Nutzungssysteme wird die prozentuale Veränderung des jeweiligen Bodenparameters ausschließlich dann präsentiert, wenn der Rang- bzw. T-Test einen signifikanten Unterschied (mindestens $p < 0,05$) ausweist.

Die Signifikanzgrenzen sind wie in wissenschaftlichen Publikationen üblich gekennzeichnet: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns = nicht signifikant

Das Design der Feldversuche (Lateinisches Quadrat) wurde bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da die Bodenprobennahmen niemals vollständig in allen Behandlungen gleichzeitig durchgeführt worden sind. Die Daten wurden so verrechnet, als handele es sich um eine Anlage mit randomisierten Blöcken.

Einige Fragestellungen erforderten die Anwendung multivariater Verfahren, die im folgenden kurz erläutert werden sollen.

7.1 Die Faktorenanalyse

Grundsätzliche Zielsetzung der Faktorenanalyse ist es, den Wirkungszusammenhang zwischen einer Vielzahl von Variablen zu erklären. Hierzu werden voneinander abhängige Variablen zu komplexen Variablenbündeln verdichtet, "Faktoren" genannt. Das Maß für den Zusammenhang zwischen Variablen und Faktoren sind die sog. Faktorladungen.

Erster Schritt ist die Erstellung einer Korrelationsmatrix. Die Faktorenanalyse unterstellt nun, daß sich die Korrelationen zwischen den Variablen durch komplexe, voneinander unabhängige Einflußfaktoren beschreiben lassen. Jeder Ausgangswert läßt sich also "als eine lineare Kombination mehrerer (hypothetischer) Faktoren beschreiben" (BACKHAUS et al. 1996).

Die Faktorenanalyse ermöglicht eine graphische Interpretation der Daten, die darauf beruht, daß der Korrelationskoeffizient definiert ist als der Kosinus des von zwei Vektoren eingeschlossenen Winkels. Weisen zwei Vektoren einen Winkel von 90° zueinander auf, so ist der Korrelationskoeffizient gleich Null; ein Winkel von 60° entspricht einem Korrelationskoeffizienten von 0,5, was jedoch nur für standardisierte Daten gilt (Vektorlänge = 1). Ist die Vektorlänge < 1 , verringert sich der Korrelationskoeffizient entsprechend.

Die zu bildenden Faktoren kann man sich graphisch als Resultanten der Vektoren (Variablen) vorstellen. Entsprechend errechnen sich die Faktorladungen (also die Korrelation der Variablen mit den Faktoren) über den Kosinus des jeweiligen Winkels zwischen Vektor und Resultante. Negative Faktorladungen zeigen an, daß eine negative Korrelation zwischen Faktor und Variable vorliegt.

Bei der Extraktion der Faktoren wird deren Anzahl so gering wie möglich gehalten. Sie hängt, vereinfacht gesagt, davon ab, wieviele "Resultanten" nötig sind, um die auftretende Variation der Korrelationskoeffizienten vollständig zu erklären. Darüber hinaus gibt es statistische Verfahren zur Bestimmung der Faktorenanzahl, wie z.B. das Kaiser-Kriterium, das hier angewandt wurde. Es finden nur solche Faktoren Berücksichtigung, deren Eigenwert > 1 ist (Eigenwert = Summe der quadrierten Faktorladungen eines Faktors).

Bei dem hier angewandten Verfahren handelt es sich um die sog. Hauptkomponentenanalyse. Wesentliches Charakteristikum dieses Analysetyps ist, daß der Startwert der Kommunalitätsschätzung (Kommunalität = Teil der Gesamtvarianz einer Variablen, der durch die extrahierten Faktoren erklärt wird) gleich 1 ist, d.h. man geht davon aus, daß die Varianz einer Variablen vollständig über die Faktoren erklärt werden kann. Dabei wird bewußt ignoriert, daß die Varianz einer Variablen nicht nur spezifisch ist, sondern einen Meßfehler beinhaltet. Der Maximierung der Kommunalität wurde jedoch Priorität eingeräumt, da Vergleichsanalysen mit anderen Analysetypen, bei der diese sog. Einzelrestvarianz berücksichtigt wird (z.B. die Hauptachsenanalyse), stets zu ähnlichen oder gleichen Ergebnissen führten.

Zur Erleichterung der Interpretation der Analyseergebnisse wurde die sog. normalisierte Varimax-Rotation durchgeführt. Dabei werden die Achsen so um den Nullpunkt gedreht, daß die Ladungen möglichst vieler Variablen innerhalb des einen Faktors maximiert und innerhalb des anderen minimiert werden. Graphisch heißt das nichts anderes, als daß die Variablen möglichst dicht an den Achsen liegen.

Für eine Vielzahl von Fragestellungen ist der abschließender Rechenschritt bei der Faktorenanalyse die Bestimmung der Faktorwerte. Diese stellen, graphisch gesehen, die Position der Untersuchungsobjekte (Behandlungen, Standorte o.ä.) zu den extrahierten Faktoren dar. Dabei kennzeichnen hohe positive Faktorwerte eine überdurchschnittliche Ausprägung, negative Faktorwerte eine unterdurchschnittliche Ausprägung des Objektes in bezug auf den jeweiligen Faktor.

7.2 Die Diskriminanz-Analyse

Das Grundprinzip der Diskriminanzanalyse besteht darin, eine Vielzahl von Variablen durch Linearkombination zusammenzufassen. Dieses geschieht mit Hilfe der Diskriminanzfunktion, die für zahlreiche Merkmalsvariablen den sog. Diskriminanzwert liefert. Die Differenz zwischen den Diskriminanzwerten mehrerer Elemente stellt ein Maß für deren Unterschiedlichkeit dar. Bildet man den Mittelwert der individuellen Diskriminanzwerte, so erhält man das sog. Gruppenmittel (Zentroid). Die Differenz der Zentroide zweier oder mehrerer Gruppen ist das Maß für deren Unterschiedlichkeit.

Die Diskriminanzanalyse bietet darüber hinaus die Möglichkeit zu prüfen, welche Merkmalsvariablen (in diesem Fall Bodenparameter) die Unterschiedlichkeit der Gruppen (Phasen des traditionellen Anbaus oder verschiedene Anbausysteme) bedingen. Ein geeignetes Maß ist hierfür der standardisierte Diskriminanzkoeffizient, der sich aus der Multiplikation des Diskriminanzkoeffizienten mit der entsprechenden Standardabweichung errechnet. Je höher der Betrag des standardisierten Diskriminanzkoeffizienten, umso größer ist die diskriminatorische Bedeutung des jeweiligen Parameters.

IV Ergebnisse und Diskussion

1 Kulturpflanzenenerträge

1.1 Mais (*Zea mays*)

Cumarú/ Iracema

In Tabelle 12 sind die Ertragsparameter für Mais in Cumarú und Iracema dargestellt. Der Standort Cumarú zeigt im traditionellen Anbausystem mit 18,2 bzw. 13,3 dt ha⁻¹ ein signifikant höheres Ertragsniveau ($p < 0,001$) bei Kolben und Körnern gegenüber dem Standort Iracema, wo 13,0 bzw. 9,6 dt ha⁻¹ erzielt wurden.

Die Streuung der Maisertragsdaten ist i.a. hoch. Der Variationskoeffizient liegt im traditionellen Anbau mit 18-27 % am Standort Cumarú unter den in Iracema ermittelten Werten (22-32 %). Für die Berechnung der Ertragsdaten des traditionellen Anbaus wurden die Behandlungen 2 und 5 zusammengezogen (beide Behandlungen unterschieden sich bis zur Maisernte nicht; $n = 14$). Alle anderen Zahlen sind Mittelwerte der jeweiligen Behandlungen ($n = 7$); Ausnahme ist Behandlung 4 (Anbau ohne Brennen) in Iracema mit $n = 6$ (s. III3.2.1).

Anbau ohne Brennen

Ein Vergleich der beiden Standorte zeigt widersprüchliche Tendenzen (Tabelle 12). So führt ein Verzicht auf das Brennen in Cumarú zu einer Steigerung, in Iracema dagegen zu einer Abnahme aller Maisertragsparameter. Dabei kommt es in Cumarú zu einem Ertragszuwachs beim Korn von 2,1 dt ha⁻¹ (ns), in Iracema zu einem Minderertrag von 3,2 dt ha⁻¹ ($p < 0,05$), was einem Zuwachs bzw. Verlust von +16 bzw. -33 % entspricht.

Anbau mit Bohnen (*Vigna unguiculata*)

Der Anbau des Mais in Monokultur (der Maniok wurde im Anbausystem mit *Vigna* erst zum Zeitpunkt der Maisernte gepflanzt) zeigt keinen signifikanten Effekt auf die Maisertragsdaten. Es scheint also, daß es im traditionellen Anbausystem zwischen Mais und Maniok zu keiner den Maiserträgen abträglichen Konkurrenz gekommen ist.

Tabelle 12 Maisertragsparameter (Trockengewichte in dt ha⁻¹) in den verschiedenen Anbausystemen der Feldversuche Cumarú und Iracema

	traditioneller Anbau	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Vigna</i>
Cumarú			
Strohgewicht	12,5	14,6 ns ⁺	12,6 ns
Kornertrag	13,3	15,4 ns	14,3 ns
Spindelgewicht	3,5	5,3 **	3,7 ns
Kolbenertrag	18,2	21,8 *	19,5 ns
Gesamtphytomasse	29,2	35,3 *	30,6 ns
Iracema			
Strohgewicht	12,2	10,3 ns	11,5 ns
Kornertrag	9,6	6,4 *	9,3 ns
Spindelgewicht	3,6	3,0 ns	3,4 ns
Kolbenertrag	13,0	9,6 ns	13,1 ns
Gesamtphytomasse	25,3	19,7 ns	24,1 ns

⁺ die Signifikanzgrenzen beziehen sich jeweils auf den paarweisen Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem (T-Test) innerhalb jedes einzelnen Ertragsparameters

Chagas

Die Maiserträge im Feldversuch Chagas liegen mit 15,0 bzw. 19,2 dt ha⁻¹ für das Korn- bzw. Kolbengewicht leicht über der in Cumarú erzielten Produktion und deutlich (signifikant) über den Erträgen in Iracema. Das Strohgewicht ist mit 17,5 dt ha⁻¹ signifikant höher als in Cumarú und Iracema, wo lediglich 12,5 bzw. 12,2 dt ha⁻¹ gemessen wurden.

Ein Vergleich der modifizierten Anbausysteme mit dem traditionellen Anbau zeigt folgende Ergebnisse:

Anbau mit erhöhter NPK-Düngung

Eine Erhöhung der mineralischen NPK-Düngung (Behandlung 2) führt zu einer signifikanten Steigerung des Kolbenenertrages um 8,1 auf 27,3 dt ha⁻¹, des Kornertrages um 6,0 auf 21,0 dt ha⁻¹ sowie des Spindelgewichtes. Dieses entspricht einer prozentualen Steigerung der Ertragsdaten von 40-42 % . Das Strohgewicht bleibt dagegen konstant.

Anbau mit Rohphosphat-Düngung

Eine erhöhte P-Düngung in Form von Rohphosphat (Behandlung 3) hat keinen Effekt auf das Korn-, Spindel- und Kolbengewicht. Das Strohgewicht geht jedoch signifikant zurück und zwar um 38 % auf 10,8 dt ha⁻¹.

Anbau mit Bodenbearbeitung

Die manuelle Stockrodung (Behandlung 4) zeigt keinen Effekt auf die Maisertragsdaten.

Wird zusätzlich zur Stockrodung gepflügt (Behandlung 5), wird eine Zunahme des Spindel- und des Korngewichtes von 0,9 bzw. 4,2 dt ha⁻¹ gegenüber dem traditionellen Anbausystem erzielt, was einer Steigerung von 21 bzw. 28 % entspricht. Auch das Kolbengewicht ist signifikant erhöht (+29 %).

Wird die Stockrodung maschinell statt manuell durchgeführt (Behandlung 6), geht der positive Effekt des Pflügens auf das Kolben- und Korngewicht verloren. Das Strohgewicht nimmt gar gegenüber dem traditionellen Anbausystem um 24 % ab.

Die Maiserträge sind im Vergleich zum Weltdurchschnitt von 36 dt ha⁻¹ (FAOSTAT-Database 1997) sowie dem Durchschnitt in Brasilien (25 dt ha⁻¹) als sehr gering einzustufen. Das liegt zum einen an der Tatsache, daß keine Hybridsorten verwendet werden und zum anderen daran, daß das Düngungsniveau gering ist. Das Ertragsniveau auf den Feldern der Kleinbauern ist im Durchschnitt noch niedriger - nach IBGE (1985) liegen die Maiserträge in der Zona Bragantina um 7 dt ha⁻¹. Die Ursache für diese niedrigen Erträge dürfte ein mangelhaftes Management sein, insbesondere eine unzureichende Unkrautbekämpfung.

Tabelle 13 Maisertragsparameter (Trockengewichte in dt ha⁻¹) im Feldversuch Chagas

Behandlung	tradit. Anbau	Anbau mit zusätzlicher NPK- Düngung	Anbau mit Rohphosphat- Düngung	Anbau mit manueller Stockrodung	Anbau mit manueller Stockrodung und Pflügen	Anbau mit maschineller Stockrodung und Pflügen
	1	2	3	4	5	6
Strohgewicht	17,5	16,7 ns ⁺	10,8 **	17,7 ns	19,3 ns	13,3 *
Kornertrag	15,0	21,0 *	15,8 ns	16,1 ns	19,2 **	14,7 ns
Spindelgewicht	4,3	6,0 *	4,8 ns	4,6 ns	5,2 *	4,2 ns
Kolbenertrag	19,2	27,3 *	20,4 ns	20,4 ns	24,8 **	19,8 ns
Gesamt- phytomasse	36,6	44,0 ns	31,3 ns	38,1 ns	44,1 ns	33,1 ns

⁺ die Signifikanzgrenzen beziehen sich jeweils auf den paarweisen Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem (T-Test) innerhalb jedes einzelnen Ertragsparameters

1.2 Maniok (*Manihot esculenta*)

Cumarú/ Iracema

In Tabelle 14 sind die Ertragsparameter für Maniok in Cumarú und Iracema dargestellt.

Alle Ertragsparameter sind in Cumarú signifikant höher als in Iracema. Der Knollenertrag liegt im traditionellen Anbau in Cumarú bei 14,2, in Iracema bei 12,8 t ha⁻¹. Das Blatt- und Sproßgewicht sind in Cumarú mit 2,0 bzw. 8,6 t ha⁻¹ etwa doppelt so hoch wie in Iracema (1,1 bzw. 4,3 t ha⁻¹).

Anbau ohne Brennen

Der Verzicht auf das Brennen (Behandlung 4) bringt sowohl in Cumarú als auch Iracema gegenüber dem traditionellen Anbau einen geringen Minderertrag von Knollen und Sproß mit sich - die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Anbau mit Bohne (*Vigna unguiculata*)

Das Anbausystem mit *Vigna* (Behandlung 3) zeigt in Cumarú mit 19,2 t ha⁻¹ eine signifikant höhere Knollenproduktion gegenüber dem traditionellen Anbau (Behandlung 2), was einer Ertragssteigerung von 35 % entspricht.

Auch in Iracema kommt es zu einer Steigerung des Knollenertrages von 12,8 auf 14,0 t ha⁻¹, sie ist jedoch statistisch nicht abzusichern.

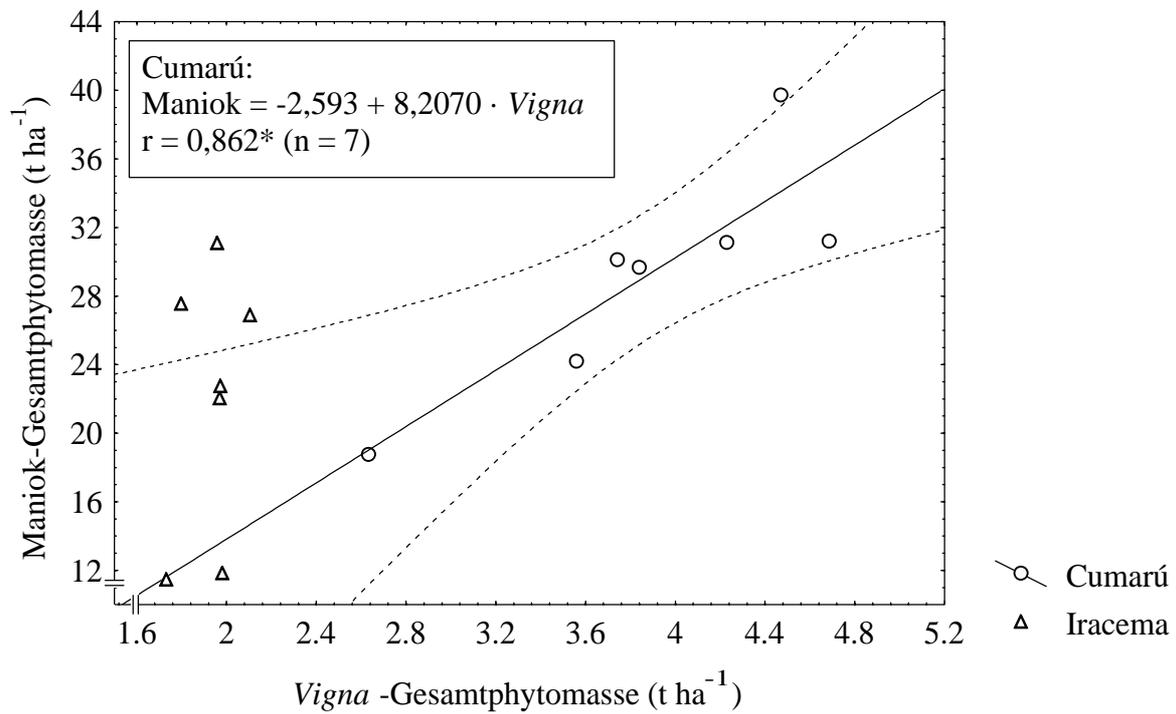
Tabelle 14 Maniokertragsparameter (Trockengewichte in t ha⁻¹) in den Feldversuchen Cumarú und Iracema

	traditioneller Anbau	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau mit <i>Canavalia</i>
Cumarú				
Knollengewicht	14,2	13,2 ns ⁺	19,2 **	11,4 *
Blattgewicht	2,0	2,1 ns	1,0 ***	2,4 ns
Sproßgewicht	8,6	8,0 ns	9,0 ns	6,6 *
Gesamtphytomasse	24,2	23,3 ns	29,3 ns	20,0 **
Iracema				
Knollengewicht	12,8	11,1 ns	14,0 ns	12,8 ns
Blattgewicht	1,1	1,2 ns	0,6 ns	1,4 ns
Sproßgewicht	4,3	4,1 ns	7,3 ns	4,4 ns
Gesamtphytomasse	18,7	16,0 ns	21,9 ns	18,6 ns

⁺ die Signifikanzgrenzen beziehen sich jeweils auf den paarweisen Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem (T-Test) innerhalb jedes einzelnen Ertragsparameters

Entscheidend für den Knollenmehrertrag in Cumarú dürfte die Tatsache sein, daß die Wachstumsperiode zeitlich verschoben ist: im traditionellen Anbau wurde Anfang Februar 1993 gepflanzt und Mitte Februar 1994 geerntet, im Anbau mit *Vigna* erfolgte das Pflanzen Mitte Mai 1993, die Ernte Mitte Juni 1994. Diese zeitliche Verschiebung führt dazu, daß im traditionellen Anbausystem der Maniok in seiner frühen Entwicklungsphase direkt mit dem Mais um Licht und Nährstoffe konkurrieren mußte. Im Anbau mit Bohnen wurde Mitte Mai zum Zeitpunkt der Bohnenaussaat und des Maniokpflanzens eine Startdüngung von 40 kg des NPK-Düngers '10-28-20' gegeben, wovon u.U. auch der Maniok profitiert hat. Außerdem dürfte die Konkurrenzwirkung der Bohne deutlich geringer sein als die der Maiskultur. Es ist im Gegenteil vorstellbar, daß die bessere Entwicklung der Bohnenkultur in Cumarú gegenüber

(a)



(b)

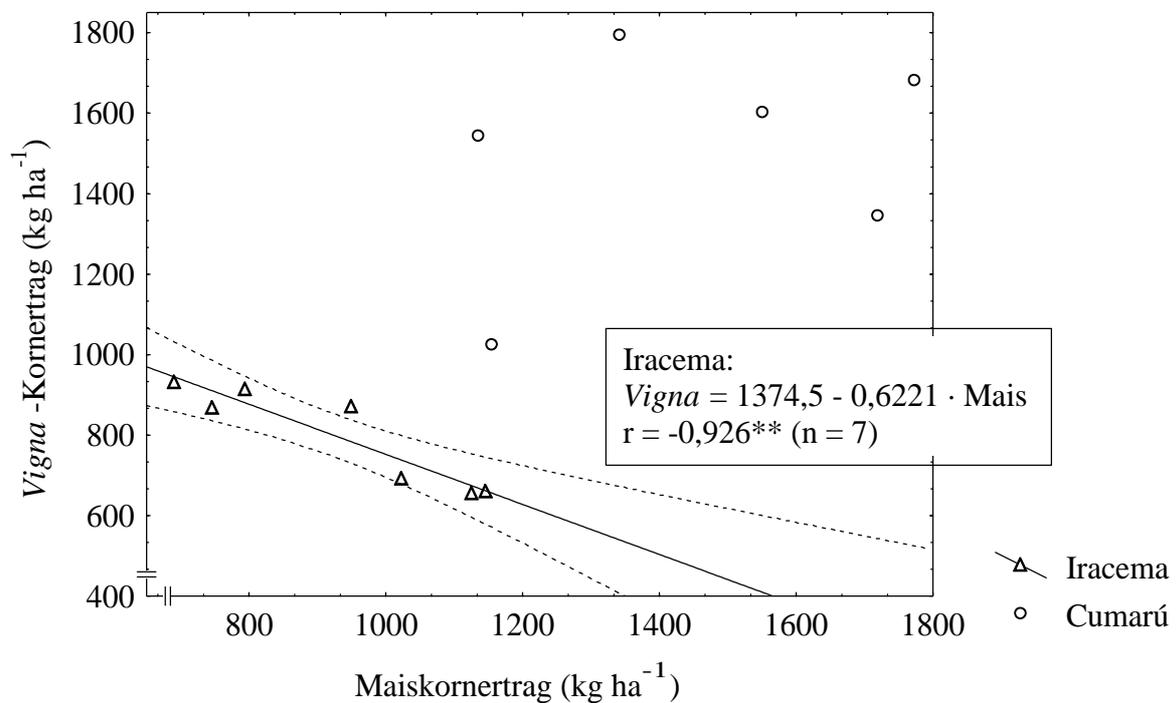


Abbildung 4 a,b Zusammenhang (a) zwischen der *Vigna*- und der Maniok-Gesamtphytomasse und (b) zwischen dem Maiskorn- und *Vigna*-Kornertrag in Cumarú und Iracema
 gestrichelte Linie 95 % = Signifikanzgrenze der Regression

Iracema einen positiven Effekt auf das Wachstum des Manioks hatte, insbesondere was die Stickstoffversorgung anbelangt.

Besonders deutlich wird der unterschiedliche Effekt der Bohnen-Integration an den zwei Standorten, wenn man die Korrelationsanalysen (nur Behandlung 3 einbezogen, $n=7$) zwischen den Ertragsparametern von Mais, Bohnen und Maniok berechnet. So sind in Cumarú die Gesamtphytomassen von *Vigna* und Maniok mit $r = 0,862^*$ positiv miteinander korreliert, was für den positiven Effekt der Bohnen auf den Maniokertrag spricht (Abbildung 4a). Umgekehrt liegt in Iracema eine negative Korrelation zwischen den Kornerträgen von Mais und *Vigna* vor ($r = -0,926^{**}$), ein Beleg dafür, daß sich der Mais auf Kosten der Bohnen entwickelt hat (Abbildung 4b; vgl. IV 4.2). Die Beziehung zwischen Maniok und *Vigna* ist in Iracema nicht signifikant. Das gleiche gilt für den Zusammenhang zwischen dem Maiskornertrag und dem Bohnenertrag in Cumarú. Die pedologischen Ursachen werden in den Kapiteln IV 5.1.2 und 5.4 diskutiert.

Anbau mit Bodendecker (*Canavalia ensiformis*)

Im Anbausystem mit *Canavalia* als Bodendecker (Behandlung 5) sind in Cumarú das Maniokknollengewicht, das Sproßgewicht sowie die Gesamtphytomasse signifikant gegenüber dem traditionellen Anbau zurückgegangen, das Blattgewicht ist leicht erhöht (ns; Tabelle 14).

In Iracema hat die Integration der *Canavalia* keinen Effekt auf die Ertragsparameter des Maniok.

Vergleicht man die Entwicklung der *Canavalia* an beiden Standorten miteinander, so zeigt sich, daß diese in Cumarú wesentlich besser war als in Iracema: nach SOUZA COELHO (pers. Mitteilung) betrug ihre Phytomasse Mitte Januar 1994 in Cumarú 2170 kg ha^{-1} , in Iracema lediglich 360 kg ha^{-1} . Es ist vorstellbar, daß das gute Gedeihen der *Canavalia* in Cumarú auf Kosten der Entwicklung des Manioks ging (vgl. IV 5.5).

Chagas

Das Ertragsniveau von Maniok liegt am Standort Chagas deutlich über dem in Cumarú und Iracema. Im traditionellen Anbausystem wurde ein Knollenertrag von $17,4 \text{ t ha}^{-1}$ und ein Sproßgewicht von $12,0 \text{ t ha}^{-1}$ erzielt. Lediglich das Blattgewicht unterscheidet sich mit $1,7 \text{ t ha}^{-1}$ nicht wesentlich von dem der beiden anderen Standorte (Tabelle 15).

Die Knollengewichte der einzelnen Anbausysteme zeigen keine signifikanten Unterschiede.

Anbau mit erhöhter NPK-Düngung

Zu tendenziellen Einbußen gegenüber dem traditionellen Anbausystem kam es jedoch in dem zusätzlich NPK-gedüngten Anbau (Behandlung 2) in Höhe von $3,9 \text{ t ha}^{-1}$, was einer Ertragsminderung von -22 % entspricht (ns). Die Düngung der Maiskultur mit entsprechend höheren Kornträgen hat einem Rückgang des Maniokknollenertrages zur Folge.

Anbau mit Bodenbearbeitung

Im Anbausystem mit intensiver mechanischer Bodenbearbeitung (Behandlung 6) kommt es zu einem Rückgang aller Maniokertragsparameter, wobei lediglich der Rückgang des Sproßgewichtes von $12,0$ auf $8,5 \text{ t ha}^{-1}$ statistisch absicherbar ist. Die Abnahme des Knollenertrages gegenüber der Referenz beträgt $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ bzw. -32 %, ist also beträchtlich, jedoch nicht signifikant.

Tabelle 15 Maniokertragsparameter (Trockengewichte in t ha^{-1}) im Feldversuch Chagas

Behandlung	tradit. Anbau	Anbau mit zusätzlicher NPK-Düngung	Anbau mit Rohphosphat-Düngung	Anbau mit manueller Stockrodung	Anbau mit manueller Stockrodung und Pflügen	Anbau mit maschineller Stockrodung und Pflügen
	1	2	3	4	5	6
Knollengewicht	17,4	13,5 ns ⁺	18,2 ns	16,5 ns	18,7 ns	11,8 ns
Blattgewicht	1,7	2,1 ns	1,7 ns	1,7 ns	1,9 ns	1,4 ns
Sproßgewicht	12,0	11,6 ns	10,7 ns	10,3 ns	10,0 ns	8,5 *
Gesamt-phytomasse	31,1	27,5 ns	30,6 ns	28,8 ns	32,0 ns	21,7 ns

⁺ die Signifikanzgrenze bezieht sich auf den paarweisen Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem (T-Test) innerhalb jedes einzelnen Ertragsparameters

Das Ertragsniveau bei Maniok liegt in der Größenordnung des Durchschnitts von Brasilien von $12,1 \text{ t ha}^{-1}$ (FAOSTAT-Database 1997) und etwas über dem Weltdurchschnitt von knapp unter 10 t ha^{-1} . Das IBGE (1985) gibt auch für die 'Zona Bragantina' einen durchschnittlichen Maniokknollenertrag von 10 t ha^{-1} an.

1.3 Bohnen (*Vigna unguiculata*)

In Tabelle 16 sind die Stroh-, Korn- und Hülsengewichte und die Gesamtphytomasse der Bohnen (*Vigna unguiculata*) in Cumarú und Iracema (Behandlung 3) dargestellt. Alle Ertragsparameter weisen am Standort Cumarú doppelt so hohe Werte auf als in Iracema. Die Erträge liegen im Bereich der in Feldversuchen des CPATU ermittelten Produktivität der Sorte 'BR-3' von 1700 kg ha⁻¹ in Tracuateua (Bragança) und 900 kg ha⁻¹ in Capitão-Poço (s. Abb. 1).

Tabelle 16 Stroh-, Korn- und Hülsengewichte sowie die Gesamtphytomasse (Trockengewicht in dt ha⁻¹) von *Vigna unguiculata* in den Feldversuchen Cumarú und Iracema (Beh. 3)

	Cumarú	Iracema	T-Test
Strohgewicht	18,1	9,0	***
Korngewicht	15,5	8,0	***
Hülsengewicht	5,2	2,4	***
Gesamtphytomasse	38,8	19,4	***

T-Test zum Standort-Vergleich (n=7)

2 Die Brachephase des traditionellen Anbausystems

2.1 Bodenchemische Veränderungen während der Brachephase des traditionellen Anbausystems

pH-Wert

Als besonders sensibler Parameter, was die Abhängigkeit von der Brachedauer anbelangt, erweist sich der pH-Wert (Abbildung 5, Tabelle 17). In *Cumarú* nehmen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ in allen Bodentiefen im Laufe der Brachephase ab - in 0-5 cm Bodentiefe von 6,28 auf 5,05 bzw. von 5,20 auf 3,62 (Tabelle 17). In der Chronosequenz *Marcelino* nimmt der

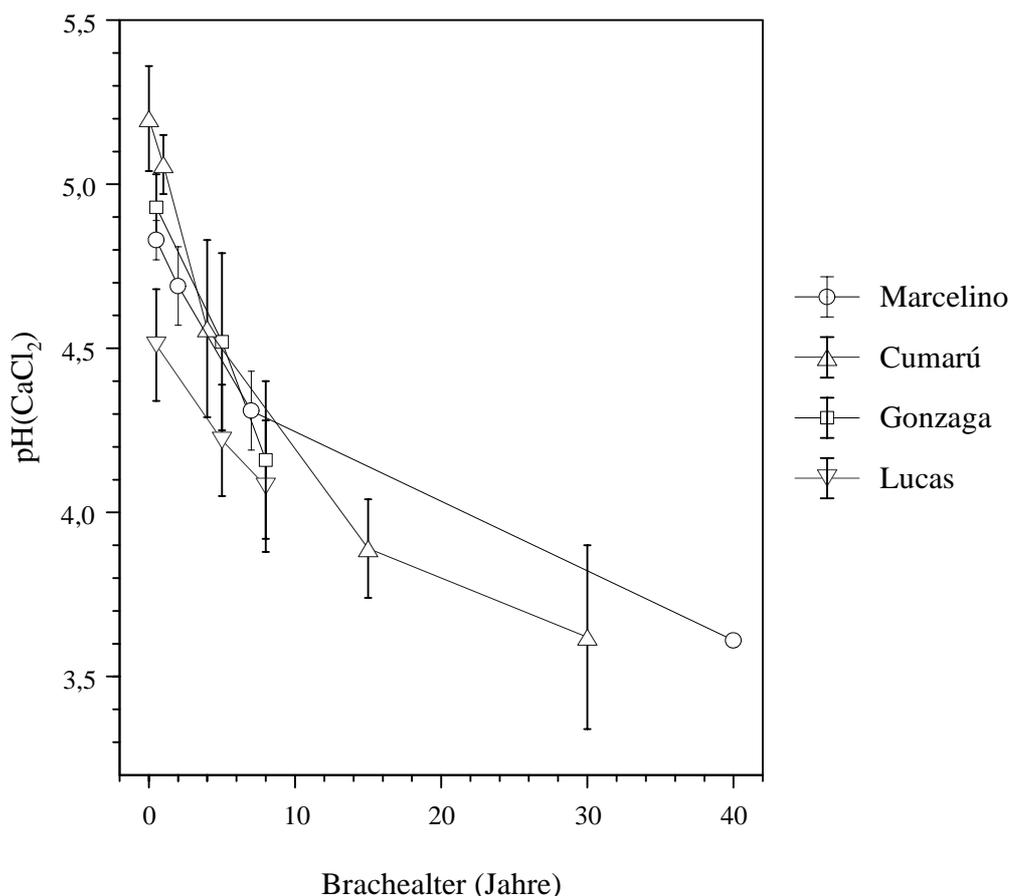


Abbildung 5 Die Veränderung des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Wertes im Boden in Abhängigkeit vom Alter der Brachevegetation und der Bodentiefe in den Chronosequenzen *Cumarú* (0-5 cm), *Marcelino* (0-10 cm), *Gonzaga* (0-10 cm) und *Lucas* (0-10 cm) (| = Standardabweichung)

pH(H₂O) in 0-10 cm Bodentiefe von 5,64 in der Maniokfläche auf 4,36 in der alten Brache ab, der pH(CaCl₂) von 4,83 auf 3,61. Die Korrelationen mit dem Brachealter sind in allen Chronosequenzen und allen Bodentiefen mindestens signifikant ($p < 0,05$) (Tabelle 18).

Die Abnahme des pH-Wertes ist primär auf zwei Sachverhalte zurückzuführen:

- (a) mit der Dauer der Brachephase nimmt der Effekt des Brennens und der damit verbundene pH-Anstieg ab,
- (b) der Boden unterliegt einem Prozeß der natürlichen Versauerung, bedingt durch die Nährstoffaufnahme der Brachevegetation (Aufnahme von Kationen, Abgabe von H⁺-Ionen), durch Kationenauswaschung, Stickstofffixierung sowie durch den Eintrag von H⁺-Ionen über die Niederschläge (PAGEL 1981).

Die pH-Unterschiede zwischen den Altersstufen der Brache sind bei der Verwendung von CaCl₂ als Extraktionslösung prägnanter als bei Wasser, was darauf zurückzuführen ist, daß die hohe Konzentration an variabler Azidität im Boden durch das höhere Austauschpotential der Calciumchlorid-Lösung in besonderem Maße zu Buche schlägt.

Die Zunahme der Bodenazidität wird in der Chronosequenz *Cumarú* darüber hinaus durch den Anstieg der H⁺-Ionenkonzentration von 1,9 auf 4,8 cmol(+) kg⁻¹ und der Al³⁺-Ionenkonzentration von 0,0 auf 0,8 cmol(+) kg⁻¹ dokumentiert. Als Konsequenz dieser Veränderungen geht die Basensättigung zurück: von 59 % zum Ende der Anbauphase auf 41 % nach 4 Jahren Brache und auf 19 % nach 30 Jahren Brache (Chronosequenz *Cumarú*). Selbst wenn die H⁺-Ionenkonzentration unberücksichtigt bleibt, wie im Falle der Chronosequenz *Marcelino* (bzw. eine andere Analyse-Methode wesentlich geringere Konzentrationen ausweist), so nimmt die Basensättigung dennoch in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm mit der Brachedauer deutlich ab, wie in Abbildung 6 dargestellt.

DIEZ et al. (1991) kommen im Rahmen von Untersuchungen in Capitão Poço (Pará, Ost-Amazonien) zu ähnlichen Ergebnissen. Der pH(H₂O) nahm in 0-10 cm Bodentiefe zweier 6- und 8-jähriger Bracheflächen und einer Primärwaldfläche von pH 6,8 über 4,8 auf pH 3,6 ab. Umgekehrt stiegen die H⁺- und Al³⁺-Konzentrationen von 0,17 über 0,20 auf 0,43 cmol(+) kg⁻¹ bzw. von 0,02 über 0,29 auf 1,07 cmol(+) kg⁻¹.

Tabelle 17 Bodenchemische Parameter in den Chronosequenzen *Marcelino*, *Cumarú*, *Gonzaga* und *Lucas*

	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	C _{org} (g kg ⁻¹)	N _t (g kg ⁻¹)	NH ₄ (mg kg ⁻¹)	NO ₃ (mg kg ⁻¹)	P _t (g kg ⁻¹)	P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	aK	KAK	Basen- sättigung (%)
Chronosequenz <i>Marcelino</i> (Bodentiefe 0-10 cm, n=3 bzw. 5, s. Tabelle 18)																	
Maniokfläche	5,64	4,83	11,4	0,86	19,2	-	5,4	-	1,69	0,27	0,032	0,02	0,00	0,0	2,20	-	-
2-j. Brache	5,56	4,69	11,6	0,86	19,3	-	4,8	-	1,56	0,29	0,057	0,02	0,17	0,0	2,29	-	-
7-j. Brache	5,20	4,31	12,9	0,84	30,7	-	4,5	-	0,99	0,26	0,041	0,02	0,45	0,0	1,89	-	-
40-j. Brache	4,36	3,61	15,4	1,20	38,7	-	5,6	-	0,12	0,09	0,034	0,02	2,64	0,0	3,14	-	-
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 0-5 cm, n=4)																	
Maniokfläche	6,28	5,20	10,2	0,90	6,0	4,0	0,17	5,0	2,20	0,40	0,055	0,025	0,0	1,9	2,68	4,58	59
1-j. Brache	6,19	5,06	11,8	1,00	9,9	3,7	0,20	3,8	2,68	0,40	0,063	0,038	0,0	2,4	3,18	5,58	57
4-j. Brache	5,82	4,56	11,3	0,95	12,0	3,0	0,20	4,0	1,55	0,43	0,058	0,048	0,1	3,0	2,08	5,08	41
15-j. Brache	5,08	3,89	11,0	1,08	19,2	2,3	0,17	3,3	1,23	0,23	0,043	0,038	0,4	3,7	1,36	5,41	25
30-j. Brache	5,05	3,62	16,1	1,48	28,7	5,9	0,47	3,8	1,00	0,50	0,063	0,043	0,8	4,8	1,21	6,73	19
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (Bodentiefe 0-10 cm, n=7)																	
½-j. Brache	6,06	4,93	12,0	1,20	13,0	-	-	5,1	1,03	0,33	0,053	0,030	0,0	2,2	1,41	3,63	39
5-j. Brache	5,89	4,52	8,9	0,91	14,2	-	-	3,1	0,87	0,37	0,044	0,030	0,0	2,4	1,06	3,48	31
8-j. Brache	5,54	4,16	9,6	0,89	13,6	-	-	2,4	0,80	0,20	0,027	0,029	0,0	2,3	0,68	2,94	23
Chronosequenz <i>Lucas</i> (Bodentiefe 0-10 cm, n=7)																	
									Ca+Mg								
½-j. Brache	5,73	4,51	11,1	1,16	12,6	-	-	3,0	0,83	0,046	0,040	0,0	2,4	0,88	3,32	27	
5-j. Brache	5,53	4,22	10,3	1,10	14,7	-	-	1,9	0,70	0,047	0,040	0,0	2,6	0,75	3,38	22	
8-j. Brache	5,28	4,08	10,5	1,10	10,6	-	-	1,7	0,64	0,049	0,039	0,0	3,5	0,73	4,19	18	

Tabelle 18 Korrelationen (Pearson) zwischen den bodenchemischen Parameter und dem Brachealter in den Chronosequenzen *Cumarú* (0-5 cm), *Marcelino* (0-10 cm), *Gonzaga* (0-10 cm) und *Lucas* (0-10 cm)

Bodentiefe	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	C _{org}	N _t	NH ₄	NO ₃	P _t	P _i (NC)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca+Mg	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺	aK	KAK	Basen- sättigung
Chronosequenz <i>Marcelino</i> (4 Altersstufen mit 3 bzw. 5 Wiederholungen: n=18, falls nicht gesondert angegeben)																	
0-10 cm	-0,921*** (n=20)	-0,939*** (n=20)	0,463 ns	0,662**	0,675* (n=12)	-	0,337 ns	-	-0,865***	-0,880***	-	-0,233 ns	0,979***	0,681**	0,698***	-	-
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (5 Altersstufen mit 4 Wiederholungen: n=20)																	
0-5 cm	-0,804***	-0,889***	0,606**	0,822***	0,945***	0,380 ns	0,825***	-0,285 ns	-0,708***	0,013 ns	-0,758***	0,008 ns	0,829***	0,914***	-0,755***	0,709***	-0,861***
5-20 cm	-0,892***	-0,837***	0,192 ns	0,554*	0,221 ns	0,567**	0,872***	-0,203 ns	-	-	-0,739***	-0,467*	0,820***	0,248 ns	-0,737***	0,187 ns	-0,797***
20-50 cm	-0,571**	-0,690***	-0,275 ns	0,127 ns	0,006 ns	-0,325 ns	0,913***	-0,404 ns	-	-	-0,524*	-0,679***	0,475*	-0,319 ns	-0,566**	-0,076 ns	-0,520*
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (3 Altersstufen mit 7 Wiederholungen: n=21)																	
0-10 cm	-0,748***	-0,823***	-0,458*	-0,770***	0,190 ns	-	-	-0,811***	-	-	-0,787***	-0,795***	- ⁺	0,082 ns	-0,779***	-0,519*	-0,778***
10-20 cm	0,391 ns	-0,072 ns	0,093 ns	-	-0,144 ns	-	-	-0,036 ns	-	-	-0,656***	-0,719***	- ⁺	0,065 ns	-	-	-
Chronosequenz <i>Lucas</i> (3 Altersstufen mit 7 Wiederholungen: n=21)																	
0-10 cm	-0,632**	-0,708***	-0,241 ns	-0,191 ns	-0,170 ns	-	-	-0,521*	-	-	-0,492*	0,257 ns	- ⁺	0,614**	-0,427 ns	0,521*	-0,694***
10-20 cm	-0,214 ns	-0,324 ns	-0,420 ns	-	-0,277 ns	-	-	-0,334 ns	-	-	-	0,011 ns	- ⁺	0,644**	-	-	-

⁺ Al-Konzentration gleich Null

Basische Kationen

Von den basischen Kationen zeigt Calcium die deutlichste Abhängigkeit von der Brachedauer, die Konzentration im Boden nimmt während der Brachephase stetig ab. In der Chronosequenz *Marcelino* geht die Ca^{2+} -Konzentration von $1,69 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ in der Maniokfläche auf $0,12 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ in der 40-jährigen Brache zurück, in *Cumarú* von $2,20$ auf $1,00 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ in der 30-j. Brache. Durch diesen Rückgang geht auch die effektive Austauschkapazität zurück, da sich Mg^{2+} , K^+ und Na^+ nur unwesentlich ändern (Abbildung 6). Kalium ist lediglich in der Chronosequenz *Gonzaga* in beiden Bodentiefen negativ mit dem Brachealter korreliert sowie in *Cumarú* in 5-20 und 20-50 cm Bodentiefe. In *Marcelino* weist die Maniokfläche mit $0,032 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ eine so geringe Kalium-Konzentration wie die 40-jährige Brache auf.

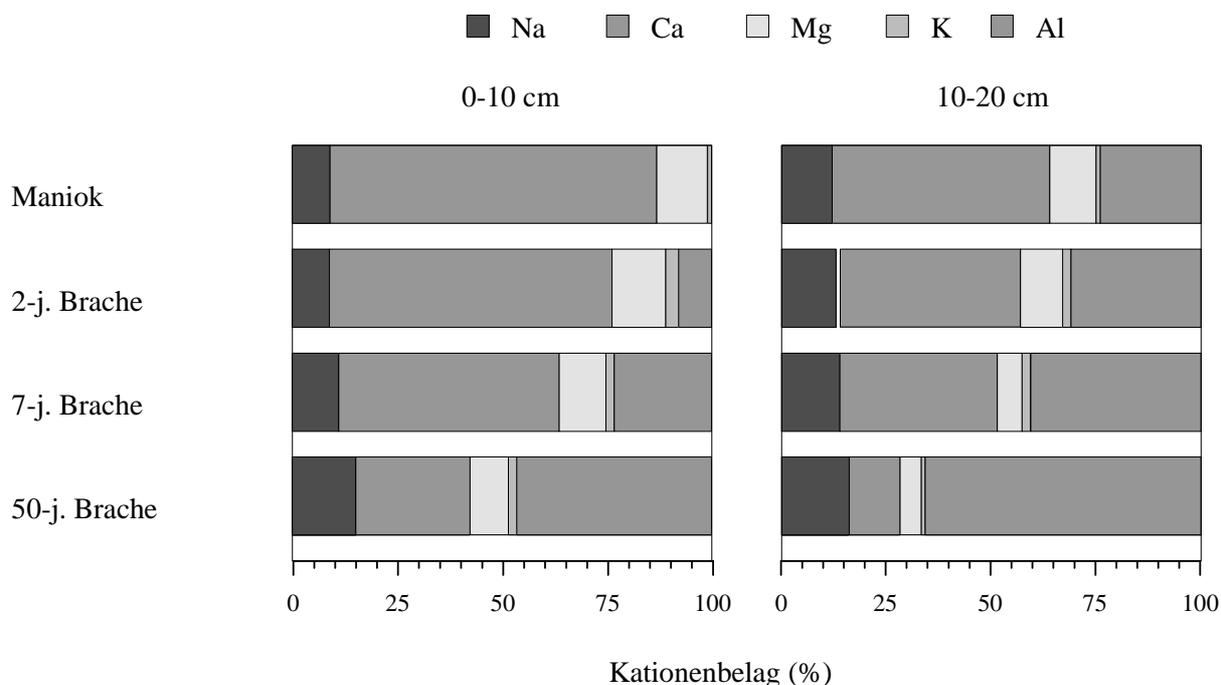


Abbildung 6 Kationenbelegung im Boden der Chronosequenz *Marcelino*, Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm

Kationenaustauschkapazität (KAK), H^+ , Al^{3+}

Die Kationenaustauschkapazität steigt mit der Brachedauer an, was vor allem auf die starke Zunahme der Belegung durch H^+ -Ionen zurückzuführen ist (Tabelle 17). Die H^+ -Konzentration steigt in *Cumarú* von $1,9 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ in der Maniokfläche auf $4,8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ in der 30-jährigen Brache. Ab einer Dauer von 2-4 Jahren Brache werden in den Chronosequenzen

Marcelino und *Cumarú* Al^{3+} -Ionen am Austauscher nachgewiesen, deren Konzentration mit der Brachedauer noch weiter zunimmt.

Organischer Kohlenstoff (C_{org})

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) sind ausgesprochen standortabhängig. Sie liegen in der Chronosequenz *Marcelino* zwischen 11,4 und 15,4 g kg^{-1} , in *Cumarú* (0-5 cm Bodentiefe) zwischen 10,2 und 16,1 g kg^{-1} , in der Chronosequenz *Gonzaga* zwischen 8,9 und 12,0 g kg^{-1} und in *Lucas* zwischen 10,3 und 11,1 g kg^{-1} .

Tendenziell steigt der C_{org} -Gehalt mit der Brachedauer an, es dauert jedoch relativ lange, bis dieser Anstieg gegenüber dem Niveau, das man in Anbauflächen findet, nachweisbar ist.

In der Chronosequenz *Marcelino* zeigt sich bereits nach 7 Jahren Brache (0-10 cm Bodentiefe) ein leichter Anstieg gegenüber den jüngeren Bracheflächen, in der Chronosequenz *Cumarú* erst nach 30 Jahren Brache (0-5 cm Bodentiefe). Die Chronosequenzen *Gonzaga* und *Lucas* zeigen keine eindeutige Tendenz in den Altersstufen 6 Monate, 5 und 8 Jahre Brache.

Die Ergebnisse der Korrelationsrechnung sind widersprüchlich. Als einzige signifikante Beziehungen wurden eine positive Korrelation in *Cumarú* (0-5 cm) und eine negative Korrelation in der Chronosequenz *Gonzaga* (0-10 cm) berechnet.

KLEINMAN et al. (1996) konnten eine, wie sie es ausdrücken, enge Assoziierung zwischen dem Humusgehalt des Bodens und der Brachedauer in ihren Untersuchungen in West-Kalimantan (Indonesien) feststellen. Nach drei Jahren Brache erholte sich der C-Gehalt von der durch den Anbau verursachten Depression. Ursache hierfür ist nach Meinung der Autoren, daß von diesem Zeitpunkt an der C-Eintrag über die Streuauflage größer ist als die Mineralisierungsrate, was zu einer Akkumulierung von organischer Substanz führt.

Stickstoff (N_t , NH_4 , NO_3)

Für die Veränderung des Gehaltes an Gesamtstickstoff im Boden gilt im Grunde das für die organische Substanz gesagte, mit dem Unterschied, daß auch in der Chronosequenz *Marcelino* eine positive signifikante Korrelation mit dem Brachealter vorliegt.

Die Gehalte an NH_4 -N liegen in 0-5 cm Bodentiefe zwischen 7,6 und 28,7 mg kg^{-1} und zeigen eine deutliche und signifikante Zunahme mit dem Alter der Brache. Die Gehalte an NO_3 -N sind als äußerst gering einzustufen (2,3-5,9 mg kg^{-1}) und unterliegen darüber hinaus einer enormen Variabilität. Lediglich in der 30-jährigen Brachefläche (0-5 cm Bodentiefe) war die Nitrat-Konzentration mit 5,9 mg kg^{-1} erhöht. Im Durchschnitt liegt NH_4 -N (während der Brachephase) in 4mal so hohen Konzentrationen vor wie NO_3 -N.

Phosphor

Die Gehalte an extrahierbarem Phosphor (P_i) zeigen eine abnehmende Tendenz mit dem Alter der Brache. In den Chronosequenzen *Gonzaga* und *Lucas* wurden signifikante, negative Korrelationen der P_i -Konzentrationen in 0-10 cm Bodentiefe und dem Brachealter errechnet.

Ursache für die Abnahme der P_i -Konzentration ist eine P-Fixierung auf zwei Ebenen: oberirdisch und unterirdisch. Einerseits wird dem Boden extrahierbarer Phosphor durch die Aufnahme der Brachevegetation entzogen. Andererseits kommt es allem Anschein nach im Verlauf der Brache zu P-Umlagerungsprozessen, die sich dahingehend äußern, daß der P_{mik} -Gehalt im Verlauf der Brache ansteigt (siehe 2.2.2).

Der Gehalt an organischem P (P_{org}) zeigt keinen signifikanten Anstieg in der Brachefläche gegenüber dem traditionellen Anbau ($NaHCO_3$ - und $NaOH$ -Extrakt) (Behandlungen 1 und 2 im Feldversuch Cumarú) (Tabelle 19). Die Brache ist mit 4 Jahren auch relativ jung. Lediglich die extrahierbare, anorganische P-Fraktion ist in der Brache signifikant geringer als in der Anbaufläche, was sich auch auf den Gesamt-P-Gehalt auswirkt.

Tabelle 19 P-Fractionen im Boden (0-10 cm) einer 4-jährigen Bracheffläche und im traditionellen Anbau beim Übergang zur Brachephase, Feldversuch Cumarú, 35 Wochen nach dem Brennen.

	4-j. Brache	traditioneller Anbau	T-Test
$NaHCO_3$-Extraktion			
P_{org} (mg kg ⁻¹)	2,4	2,3	ns
P_i (mg kg ⁻¹)	5,7	9,2	***
P_t (mg kg ⁻¹)	8,1	11,6	***
$NaOH$-Extraktion			
P_{org} (mg kg ⁻¹)	11,3	13,7	ns
P_i (mg kg ⁻¹)	4,5	6,7	**
P_t (mg kg ⁻¹)	15,8	20,4	*

2.2 Bodenbiologische Veränderungen während der Brachephase des traditionellen Anbausystems

2.2.1 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten während der Brachephase

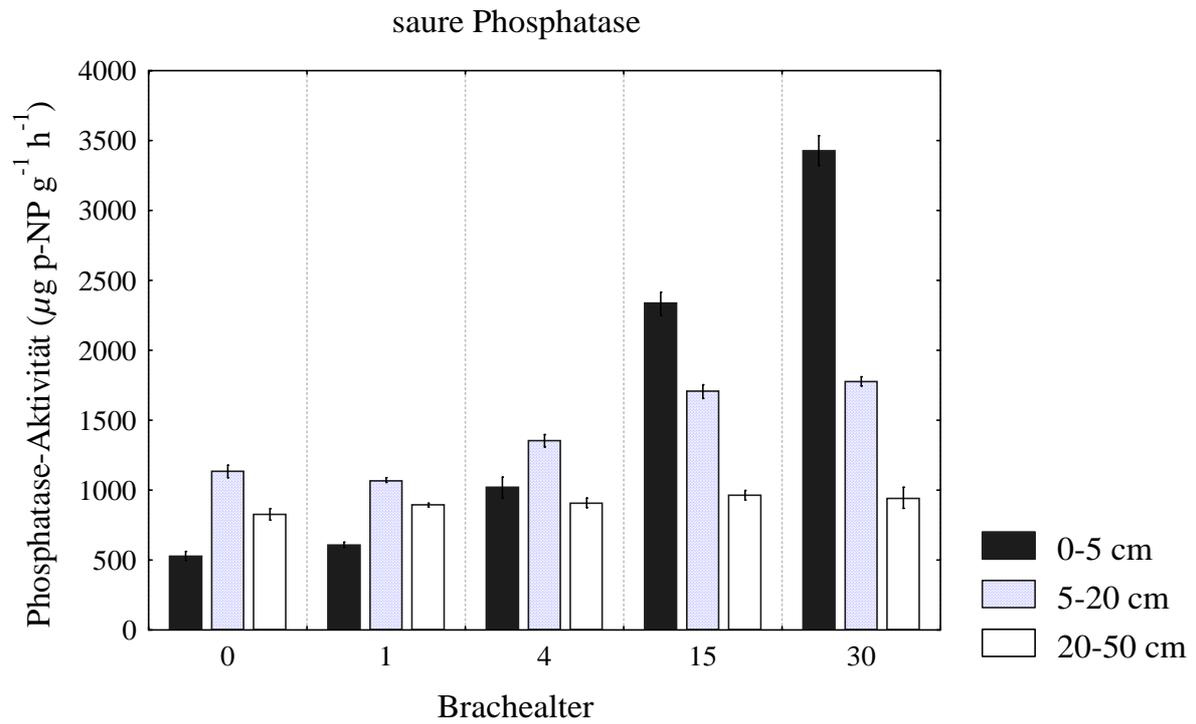
In Abbildung 7 a-f ist die Veränderung verschiedener enzymatischer Aktivitäten in Abhängigkeit von der Brachedauer in der Chronosequenz *Cumarú* dargestellt. Es wird deutlich, daß (a) das Niveau der Aktivitäten im Oberboden (hier 0-5 cm) im allgemeinen höher ist als in tiefer gelegenen Bodenschichten und (b) gerade in dieser Bodenschicht die wesentlichen Veränderungen im Verlauf der Brachephase stattfinden.

In Tabelle 20 sind alle gemessenen enzymatischen Aktivitäten in der jeweils obersten Bodenschicht der vier untersuchten Chronosequenzen dargestellt, in Anhang 5 die tiefer liegenden Bodenschichten.

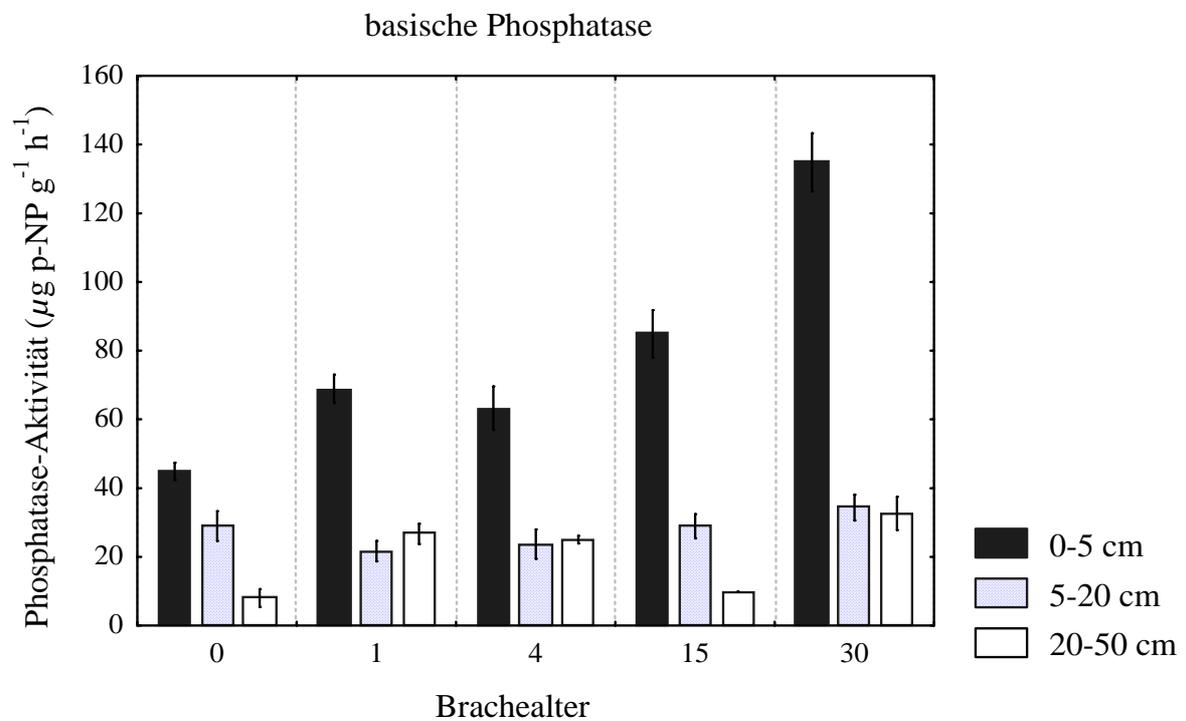
Saure Phosphatase

Die Aktivität der sauren Phosphatase im Boden steht in enger Beziehung zum Alter der Bra- che, wobei das Ausmaß der Veränderung über die Zeit mit zunehmender Bodentiefe abnimmt. Dieser Zusammenhang wird durch die Ergebnisse der Varianzanalyse der sauren Phosphatase in der Chronosequenz *Cumarú* (Tabelle 21) belegt. Es zeigt sich eine eindeutige Interaktion des Brachealters und der Bodentiefe. Dieses bedeutet, daß Veränderungen der Phosphatase- Aktivität über die Zeit, sprich die Brachedauer, in jeder Bodentiefe für sich betrachtet werden müssen, die Bodentiefen folglich auch nicht als interne Wiederholungen der Altersstufen verwendet werden können.

(a)

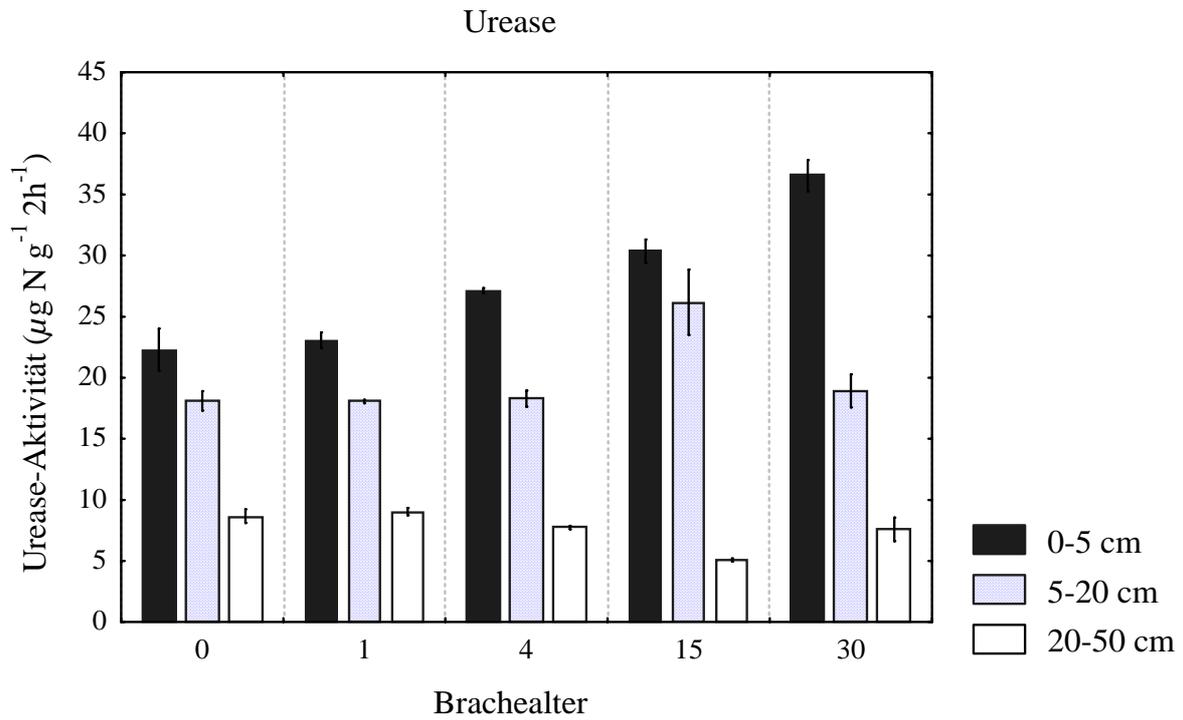


(b)

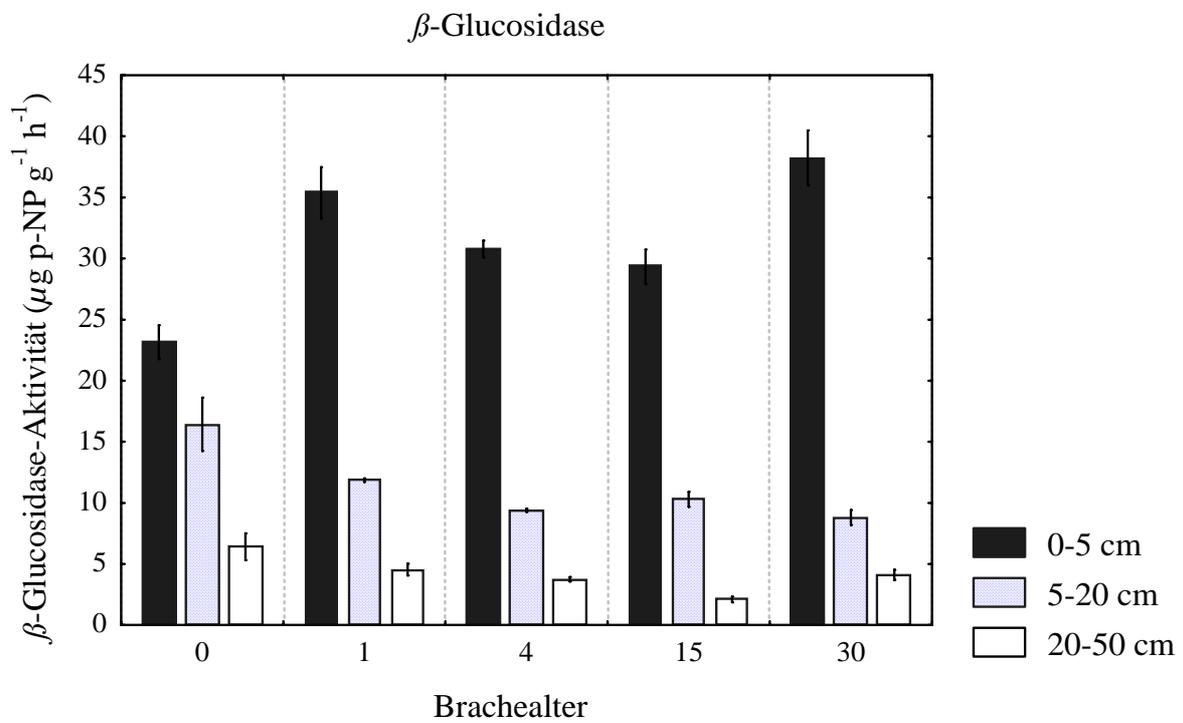


Fortsetzung

(c)

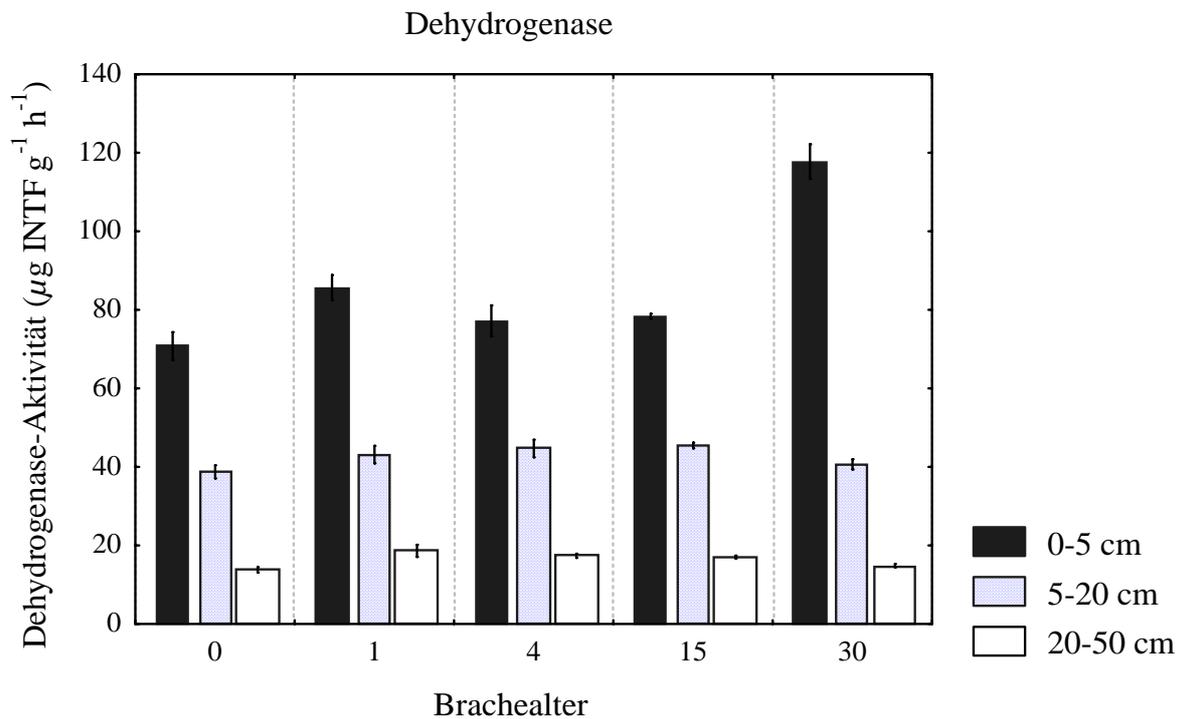


(d)



Fortsetzung

(e)



(f)

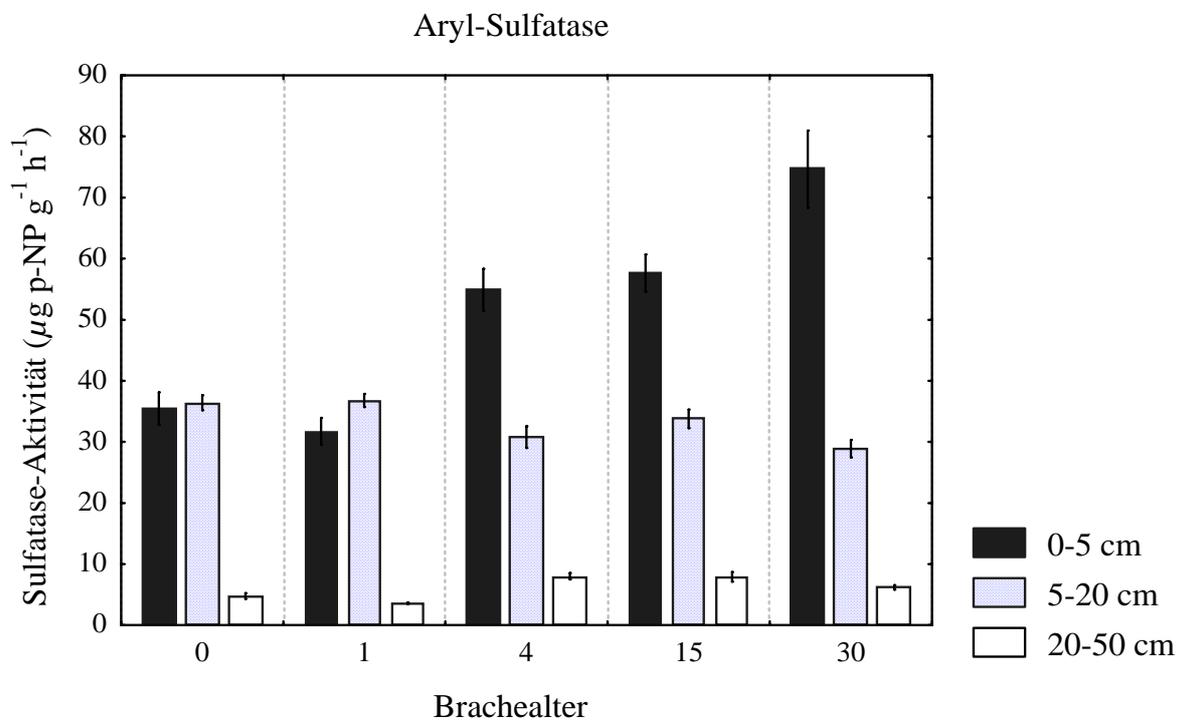


Abbildung 7 a-f Die Aktivitäten der sauren Phosphatase, basischen Phosphatase, Urease, β -Glucosidase, Dehydrogenase und Aryl-Sulfatase in Abhängigkeit vom Alter der Brachevegetation und der Bodentiefe, Chronosequenz *Cumarú* 1993, (I = Standardfehler, n=4)

Tabelle 20 Enzymatische Aktivitäten in den Chronosequenzen *Cumarú* (0-5 cm Bodentiefe), *Marcelino* (0-10 cm), *Gonzaga* (0-10 cm) und *Lucas* (0-10 cm)

	saure Phosphatase	basische Phosphatase	Urease	Aryl- Sulfatase	β - Glucosidase	Dehydro- genase	Cellulase
	$\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{g N}$ $\text{g TS}^{-1} 2\text{h}^{-1}$	$\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{g INTF}$ $\text{g TS}^{-1} 2\text{h}^{-1}$	$\mu\text{g GLC}$ $\text{g TS}^{-1} 24\text{h}^{-1}$
Chronosequenz <i>Marcelino</i> (Bodentiefe 0-10 cm)							
Maniokfläche	598	-	13,1	-	-	30,6	169
2-j. Brache	628	-	18,5	-	-	35,7	222
7-j. Brache	976	-	21,6	-	-	22,1	347
40-j. Brache (Wald)	2109	-	39,7	-	-	43,5	458
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 0-5 cm)							
Maniokfläche	530	45	22,3	35,4	23,2	71	-
1-j. Brache	609	69	23,1	31,7	35,4	86	-
4-j. Brache	1018	63	27,1	54,9	30,8	77	-
15-j. Brache	2333	85	30,4	57,6	29,3	78	-
30-j. Brache	3427	135	36,5	74,7	38,2	118	-
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (Bodentiefe 0-10 cm)							
halbjährige Brache	590	-	30,3	-	32,2	-	-
5-jährige Brache	938	-	32,7	-	22,7	-	-
8-jährige Brache	1340	-	33,1	-	21,8	-	-
Chronosequenz <i>Lucas</i> (Bodentiefe 0-10 cm)							
halbjährige Brache	1026	-	29,6	-	20,5	-	-
5-jährige Brache	1558	-	31,3	-	20,5	-	-
8-jährige Brache	1858	-	36,7	-	20,6	-	-

Tabelle 21 Varianzanalyse der Aktivität der sauren Phosphatase in der Chronosequenz Cumarú mit den Hauptfaktoren Brachealter (1) und Bodentiefe (2)

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	3470858	45	34379	100,96	0,000
Bodentiefe (2)	2	2467488	45	34379	71,77	0,000
Interaktion von 1 und 2	8	1649732	45	34379	47,99	0,000

Das in den Böden gemessene Niveau der Aktivität der sauren Phosphatase liegt in den Maniokflächen (Bodentiefe: 0-5 bzw. 10 cm) am Standort Igarapé Açu (*Marcelino, Cumarú, Gonzaga*) zwischen 530 und 598 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in Iracema (*Lucas*) gar bei 1026 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. In 4- bis 8-jährigen Bracheflächen wurden in Igarapé Açu Aktivitäten von 976-1340 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in Iracema von 1558-1858 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ gemessen, in einer 30-jährigen Brache (*Cumarú*) von 3427 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Die gemessenen Aktivitäten sind damit im Vergleich zu Angaben in der Literatur sehr hoch. WICK (1997) fand in Alfisols in Nigeria in vergleichbaren Anbausystemen wesentlich geringere Werte. Das gleiche gilt für FUGGER (schriftl. Mitteilung), der im Norden Ghanas in Anbauflächen (0-10 cm Bodentiefe) Aktivitäten von 74-144 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ fand. EIVAZI & TABATABAI (1977) maßen in landwirtschaftlich genutzten Böden Aktivitäten von 52-196 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, RASTIN et al. (1988) in 0-5 cm Bodentiefe eines 120-jährigen Buchenwaldstandortes Aktivitäten von 40-88 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Dieses geringe Niveau ist nach RASTIN et al. (1988) auf die relativ hohen Humus- (7,5 %) und Tongehalte (54,4 %) der untersuchten Böden zurückzuführen. Sowohl die organische Substanz im Boden als auch Tonpartikel vermögen Enzyme zu adsorbieren, wodurch ihre Aktivität reduziert wird (LADD 1978; MAKBOUL & OTTOW 1979). In welchem Umfang dieses geschieht, ist jedoch wenig bekannt. Scheinbar zeigt gerade die saure Phosphatase trotz Adsorption weiterhin ein relativ hohes Aktivitätsniveau (SARKAR et al. 1989).

In den hier untersuchten Böden sind die Gehalte an Kohlenstoff und Ton mit 8,9-12,9 g kg^{-1} bzw. 5,5-10,6 % vergleichsweise niedrig, was, mit RASTIN et al. (1988) argumentiert, die hohen Aktivitäten erklären würde. Daß darüber hinaus andere Faktoren einen Einfluß auf die Aktivität der sauren Phosphatase haben, zeigt die Tatsache, daß der Standort Iracema trotz höherer Kohlenstoff- und Tongehalte im Vergleich zu Cumarú weit höhere Phosphatase-Aktivitäten aufweist.

Generell ist ein Vergleich der enzymatischen Aktivitäten mit Literaturdaten problematisch, da (a) zahlreiche verschiedene Analysemethoden zur Anwendung kommen und (b) bereits ge-

ringste Modifikationen der Probenvorbereitung (Zeitspanne zwischen Probenahme und Analyse, Art und Dauer der Lagerung) und besonders der Analytik (Inkubationstemperatur und -dauer, Substratkonzentration) zu Veränderungen des Analyseergebnisses führen können. Am ehesten ist ein Vergleich noch bei der sauren Phosphatase möglich, da zumindest die Analysemethode in den meisten Fällen die gleiche ist (TABATABAI & BREMNER 1969, EIVAZI & TABATABAI 1977).

Aktivität der sauren Phosphatase im Bodenprofil

Was die Aktivität der sauren Phosphatase im Bodenprofil anbelangt, gilt nicht generell, daß mit zunehmender Bodentiefe die Aktivität abnimmt. In Anbauflächen und jungen Brache-
flächen (1-2 Jahre alt) zeigt die Bodentiefe 5-20 bzw. 10-20 cm (Abbildung 7) eine höhere Aktivität als die darüberliegende Bodenschicht. Dieses Verhältnis kehrt sich im Laufe der Brachephase um: ab einer Brachedauer von ca. 8 Jahren verschiebt sich die Aktivität zugunsten der oberen Bodenschicht (Abbildung 8). Es kommt also während des Übergangs von der Anbau- zur Brachephase zu einer Verschiebung der Aktivität zum Oberboden.

Das Niveau der Phosphatase-Aktivität im Auflagehorizont ist hingegen in allen untersuchten Flächen weit höher als im Mineralboden (Abbildung 8). Es liegt je nach Altersstufe um das 5 bis 7fache über dem Niveau in 0-5 cm Bodentiefe (*Cumarú*). Dieses widerspricht Ergebnissen von GALLARDO & SCHLESINGER (1994), die in North Carolina (USA) im Mineralboden viermal so hohe Aktivitäten fanden als in der Streuauflage eines Waldbodens.

Zusammenhang zwischen Phosphatase-Aktivität und Brachealter

Als Maß für den Zusammenhang zwischen den biologischen Bodendaten und dem Brachealter wurden die Korrelationskoeffizienten errechnet. Ohne Frage ist es sehr zweifelhaft, ob ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen dem Alter der Brache und den diversen Bodencharakteristika besteht. Die Interpretation der Ergebnisse muß sich daher darauf beschränken, festzustellen, ob eine vom Gradienten "Zeit" abhängige Veränderung der jeweiligen Variable vorliegt oder nicht. Das Brachealter ist in diesem Fall der unabhängige Faktor, den man auch mit umgekehrtem Vorzeichen als "Nutzungsintensität" bezeichnen könnte.

Ein weiteres Problem bei dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, daß die Festlegung des Brachealters fast ausschließlich auf der Befragung der Bauern basiert, was relativ ungenau sein kann. Ein Vergleich der Korrelationskoeffizienten der einzelnen Chronosequenzen verbietet sich allein schon aus diesem Grund (s.u.). Da keine anderen Möglichkeiten der Altersbestimmung zur Verfügung standen, erscheint eine Verwendung der Altersangaben aus den Interviews gerechtfertigt.

Tabelle 22 Korrelationen (Pearson) zwischen den bodenzymatischen Parameter und dem Alter der Brache in den Chronosequenzen *Cumarú*, *Marcelino*, *Gonzaga* und *Lucas*

	saure Phosphatase	basische Phosphatase	Urease	Aryl- Sulfatase	β - Glucosidase	Dehydro- genase	Cellulase
Chronosequenz <i>Marcelino</i> (n=12)							
0-10 cm	0,9788 ***	-	0,8473 ***	-	-	0,4782 ns	0,4803 ns
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (n=20, falls nicht gesondert angegeben)							
Streuauflage	0,8930 ***	-	-0,6191 **	-	-0,8100 ***	-	-
0-5 cm	0,9751 ***	0,8307 ***	0,8279 ***	0,7374 ***	0,4329 ns	0,7279 ***	-
5-20 cm	0,8483 ***	0,3271 ns (n=18)	0,1878 ns	-0,4446 *	-0,4207 ns	-0,0083 ns	-
20-50 cm	0,2437 ns	-0,3112 ns (n=16)	-0,3505 ns (n=18)	0,1674 ns (n=17)	-0,2840 ns (n=19)	-0,1575 ns	-
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (n=21)							
0-10 cm	0,9352 ***	-	0,2827 ns	-	-0,6080 ***	-	-
10-20 cm	0,4460 *	-	-0,4214 ns	-	-0,2520 ns	-	-
Chronosequenz <i>Lucas</i> (n=21)							
0-10 cm	0,9364 ***	-	0,5212 *	-	0,0036 ns	-	-
10-20 cm	0,3917 ns	-	-0,0260 ns	-	-0,2971 ns	-	-

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind in Tabelle 22 dargestellt. Besonders deutlich ist der Zusammenhang der sauren Phosphatase mit dem Brachealter im Auflagehorizont ($r = 0,8930^{***}$) und in den Bodentiefen 0-5 cm ($r = 0,9751^{***}$) der Chronosequenz *Cumarú* bzw. in 0-10 cm der Chronosequenzen *Marcelino* ($r = 0,9788^{***}$), *Gonzaga* ($r = 0,9352^{***}$) und *Lucas* ($r = 0,9364^{***}$). Die tiefer liegenden Bodenschichten weisen deutlich geringere Korrelationen auf (*Cumarú* $r = 0,8483^{***}$, *Gonzaga* $r = 0,4460^*$, *Lucas* $r = 0,3917$ ns). Daß für die Bodentiefe 5-20 cm in der Chronosequenz *Cumarú* eine relativ enge Korrelation berechnet wurde, ist sicherlich zum Teil auf die Tatsache zurückzuführen, daß bei der Beprobung die Bodenschicht 5-10 cm mit einbezogen wurde. In 20-50 cm Bodentiefe (*Cumarú*) konnte keinerlei Effekt der Brachedauer nachgewiesen werden ($r = 0,2437$ ns).

Auch AREVALO et al. (1993) konnten einen eindeutigen Anstieg der Phosphatase-Aktivität mit Fortschreiten der Sukzession der Buschvegetation bei Untersuchungen im Mittelmeerraum nachweisen.

Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß ein Vergleich der Signifikanzniveaus der einzelnen Chronosequenzen problematisch ist, da die Korrelationskoeffizienten in starkem Maß von der Anzahl der Wiederholungen und der Altersstufen beeinflusst werden. Da diese i.d.R. verschieden sind (Ausnahme: *Gonzaga* und *Lucas*), kann sich eine Diskussion der Ergebnisse lediglich darauf beschränken festzustellen, ob ein Zusammenhang zwischen der enzymatischen Aktivität und dem Brachealter besteht oder nicht. Möglich ist hingegen ein Vergleich der Bodentiefen innerhalb jeder einzelnen Chronosequenz.

In Abbildung 8 ist der Zusammenhang zwischen der Phosphatase-Aktivität und dem Brachealter exemplarisch für drei Bodentiefen in der Chronosequenz *Cumarú* dargestellt. Vom Beginn der Brachephase bis zu einem Alter von ca. 8-10 Jahren liegt in 0-5 cm Bodentiefe ein linearer Zusammenhang vor. Sind die Bracheflächen älter, nimmt die Steigung ab und es scheint, daß es zu einer asymptotischen Annäherung der Phosphatase-Aktivität an ein Sättigungsniveau kommt. Dieser Zusammenhang wurde jedoch nicht mit Hilfe eines entsprechenden mathematischen Modells beschrieben, da über die Lage dieses Sättigungsniveaus nur spekuliert werden kann. Festzuhalten ist, daß sich die Zunahme der Phosphatase-Aktivität pro Zeiteinheit ab einer Altersstufe von ca. 8-10 Jahren verringert. In der Tiefenstufe 5-20 cm ist die Steigung der Regressionskurve kleiner, was bedeutet, daß die Zunahme der Phosphatase-Aktivität pro Zeiteinheit geringer ausfällt. Bei einem Brachealter von 20-25 Jahren geht die Steigung gegen Null. In 20-50 cm Bodentiefe liegt keine Abhängigkeit der Phosphatase-Aktivität vom Brachealter vor.

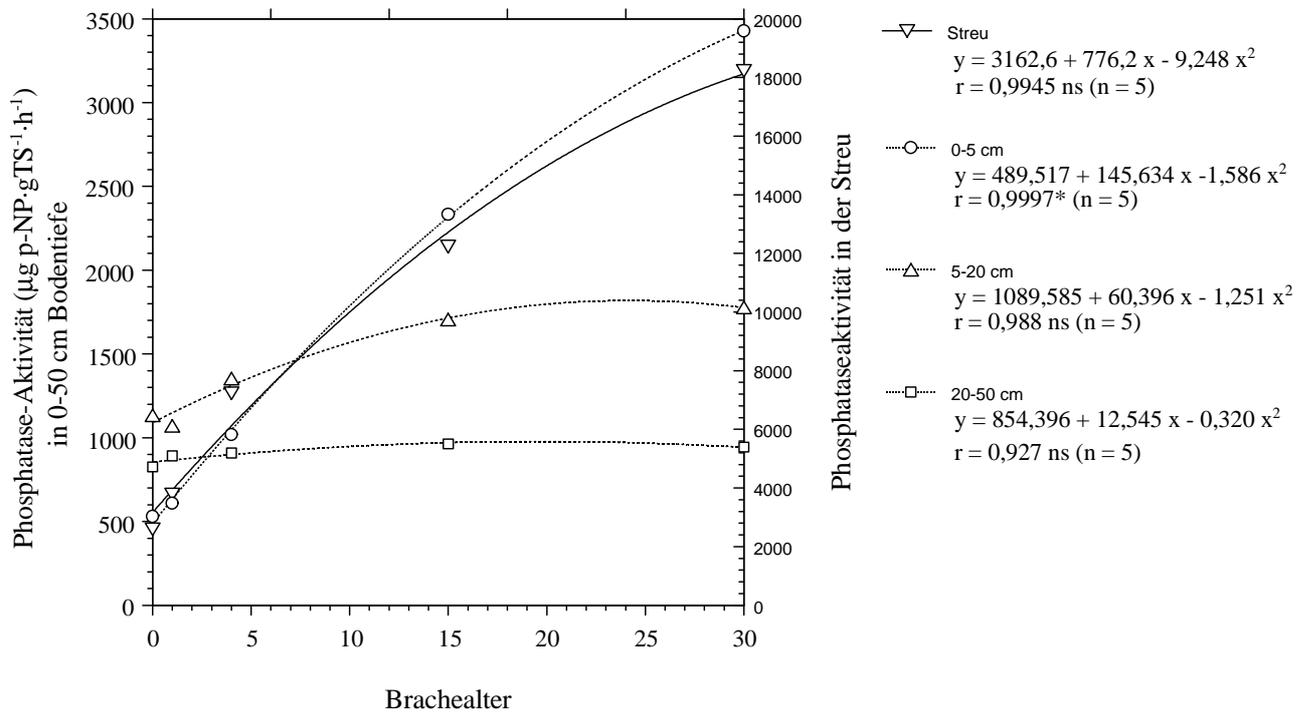


Abbildung 8 Verlauf der Aktivität der sauren Phosphatase in verschiedenen Bodentiefen der Chronosequenz *Cumarú* (0-30 Jahre), dargestellt mit Hilfe einer Polynomregression (Stufe 2)

Um die Beziehung der Phosphatase-Aktivität im Oberboden zum Alter der Brache in allen Chronosequenzen miteinander vergleichen zu können, sind die in *Marcelino* und *Cumarú* untersuchten älteren Brachen nicht in die Berechnung einbezogen worden. Das in Abbildung 9 dargestellte lineare Modell zeigt die Abhängigkeit der sauren Phosphatase in 0-5 bzw. 0-10 cm Bodentiefe von der Brachedauer im Zeitraum vom Beginn der Brache bis zum Alter von ca. 8 Jahren. Es wird deutlich, daß der Zusammenhang in allen untersuchten Chronosequenzen sehr ähnlich ist, selbst, wenn das Niveau der Phosphatase-Aktivität wie im Fall der Chronosequenz *Lucas* deutlich erhöht ist.

Abhängigkeit der sauren Phosphataseaktivität von bodenchemischen Parametern

Bei der Berechnung der multiplen Regressionen (Tabelle 23 und Tabelle 24), wurden anfangs alle scheinbar relevanten Bodenparameter einbezogen, jedoch nach und nach wegen ihrer geringen Bedeutung bei der tabellarischen Darstellung nicht mehr berücksichtigt.

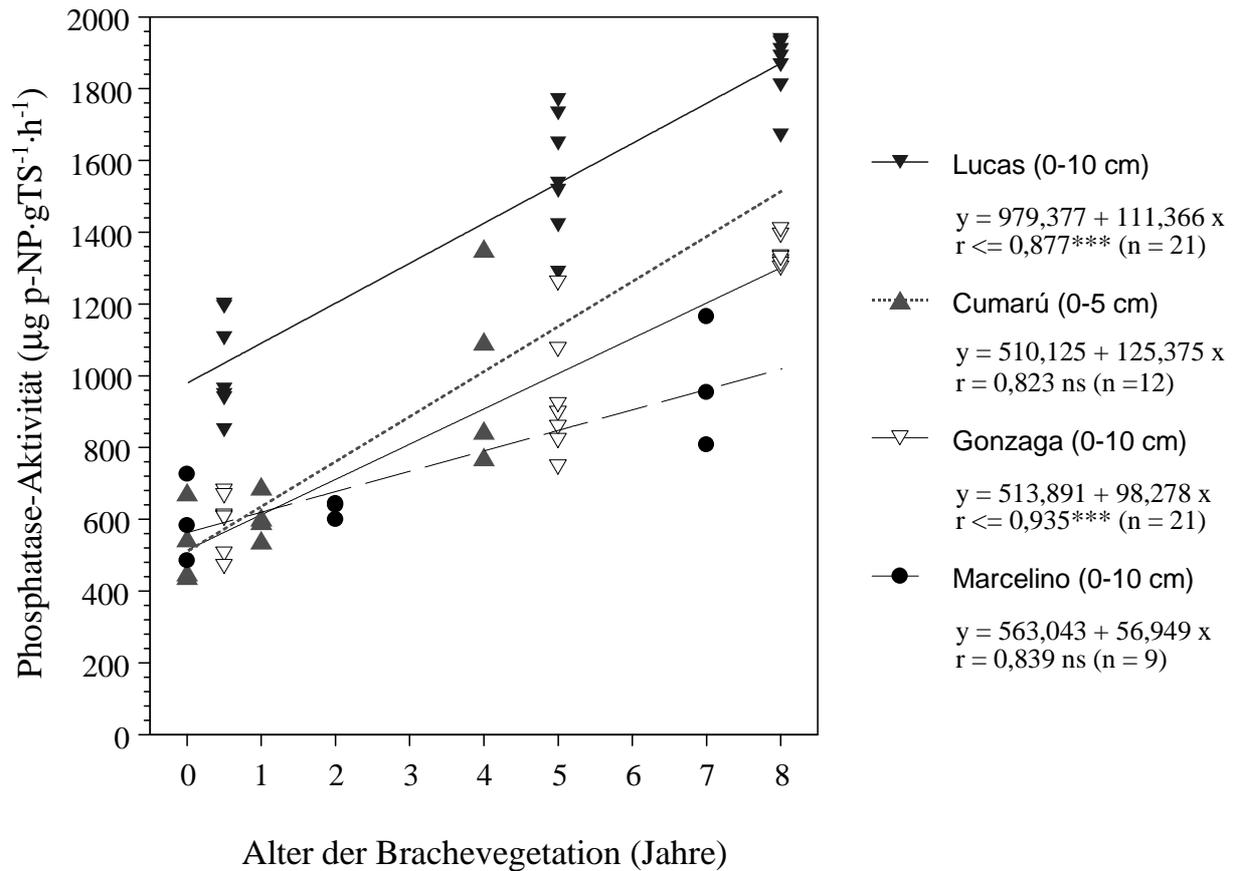


Abbildung 9 Abhängigkeit der sauren Phosphatase vom Brachealter (0-8 Jahre), dargestellt mit Hilfe eines linearen Modells in den Chronosequenzen *Marcelino*, *Cumarú*, *Gonzaga* und *Lucas*

Die Aktivität der sauren Phosphatase zeigt während der Brachephase eine deutliche Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens (Tabelle 23). In 0-5 cm Bodentiefe der Chronosequenz *Cumarú* ist sie außerdem positiv mit dem Kohlenstoffgehalt korreliert, der vor allem in der 30-jährigen Brache von Bedeutung ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit Daten von DICK (1984), FRANKENBERGER & DICK (1983) und JORDAN et al. (1995). JORDAN et al. (1995) konnten in Anbauflächen (Mais, Soja) eine positive Korrelation zwischen der Phosphatase-Aktivität und der organischen Substanz nachweisen. Das Niveau der Phosphatase-Aktivität war mit $150\text{-}375 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ vergleichsweise niedrig, der Gehalt an organischer Substanz mit 1,9-4,0 % relativ hoch, vergleicht man sie mit den hier vorliegenden Zahlen (vgl. RASTIN et al. 1988). ROJO et al. (1990) wiesen in Laborversuchen mit verschiedenen Böden eine deutliche Abhängigkeit der Phosphatase-Aktivität vom pH-Wert nach. Dabei wies die Aktivität im niedrigen pH-Bereich ein Optimum auf und ging mit steigendem pH-Wert zurück.

Die Konzentration an extrahierbarem P hat hingegen keinen Effekt auf die Aktivität der sauren Phosphatase in der Chronosequenz *Cumarú*.

Tabelle 23 Zusammenfassung einer multiplen Regression für die Aktivität der sauren Phosphatase als abhängige Variable in allen Altersstufen der Brache in den Chronosequenzen *Cumarú* (Bodentiefe 0-5 cm), *Marcelino* (0-10 cm), *Gonzaga* (0-10 cm) und *Lucas* (0-10 cm)

	partieller Regressions- koeffizient (β)	Standard- fehler β	B	Standard- fehler B	t(n)	Signifikanz- niveau
<i>Cumarú</i> (n=20)						
Interzept			6647,383	992,714	6,6962	5,14E-06
pH(CaCl ₂)	-0,7656	0,1022	-1335,105	178,167	-7,4936	1,28E-06
C _{org} (g kg ⁻¹)	0,2725	0,0958	1055,309	371,009	2,8444	0,0117
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	-0,0849	0,0928	-95,038	103,915	-0,9146	0,3740
R= 0,9416 R ² = 0,8866 korrigiertes R ² = 0,8654 F(3,16)=41,711 Standardfehler: 431,51						
<i>Marcelino</i> (n=12)						
Interzept			5409,237	703,834	7,6854	5,82E-05
pH(CaCl ₂)	-0,8753	0,0905	-1112,740	115,075	-9,6697	1,09E-05
C _{org} (g kg ⁻¹)	0,1916	0,1077	353,706	198,895	1,7784	0,1132
P _i (IBW) (mg kg ⁻¹)	0,0212	0,1035	18,405	89,790	0,2050	0,8427
R= 0,9715 R ² = 0,9439 korrigiertes R ² = 0,9229 F(3,8)=44,873 Standardfehler: 180,42						
<i>Gonzaga</i> (n=21)						
Interzept			3806,544	455,419	8,3583	2E-07
pH(CaCl ₂)	-0,7118	0,1511	-601,404	127,711	-4,7091	0,0002
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	-0,3236	0,1338	-74,858	30,965	-2,4175	0,0271
C _{org} (g kg ⁻¹)	0,1039	0,1166	142,400	159,836	0,8909	0,3854
R= 0,9137 R ² = 0,8348 korrigiertes R ² = 0,8057 F(3,17)=28,636 Standardfehler: 146,29						
<i>Lucas</i> (n=21)						
Interzept			5019,455	1115,255	4,5007	0,0003
pH(CaCl ₂)	-0,6085	0,1621	-885,841	235,995	-3,7537	0,0016
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	-0,4057	0,1961	-141,404	68,336	-2,0692	0,0541
C _{org} (g kg ⁻¹)	0,1736	0,1907	519,723	571,014	0,9102	0,3755
R= 0,7664 R ² = 0,5873 korrigiertes R ² = 0,5145 F(3,17)=8,0655 Standardfehler: 261,79						

In den Chronosequenzen *Marcelino*, *Gonzaga* und *Lucas* spielt der C_{org} -Gehalt für die Phosphatase-Aktivität eine geringere Rolle. Ein Grund hierfür könnte sein, daß in diesen Chronosequenzen die Bodentiefe 0-10 cm beprobt wurde, also eine Verwischung des in *Cumarú* nachgewiesenen Effektes auf die Bodentiefe 0-5 cm vorliegt. Dagegen ist sowohl in der Chronosequenz *Gonzaga* als auch *Lucas* der P_1 -Gehalt von Bedeutung für die Phosphatase-Aktivität, mit dem er negativ korreliert ist. Ähnliche Zusammenhänge fanden MARGESIN & SCHINNER (1994), die schlußfolgerten, daß eine hohe Aktivität der Phosphomonoesterase auf einen extremen Mangel an pflanzenverfügbaren Phosphor hindeutet.

Basische Phosphatase

Die einmalig in der Chronosequenz *Cumarú* analysierte basische Phosphatase zeigt mit 45-135 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ wesentlich geringere Aktivitäten als die saure Phosphatase. Da das Aktivitäts-Optimum der basischen Phosphatase im Bereich von pH 9-11 liegt, könnte der niedrige pH-Wert des Bodens die Ursache für die geringen Aktivitäten sein (EIVAZI & TABATABAI 1977; JUMA & TABATABAI 1977, 1978; TABATABAI 1982; CARREIRA & NIELL 1995).

Im Gegensatz zur sauren Phosphatase findet man nur sehr wenige Publikationen, die sich mit der basischen Phosphatase befassen. EIVAZI & TABATABAI (1977) maßen Aktivitäten von 39-252 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ in Böden (0-15 cm) mit einem pH-Wert von 5,8-7,8. FUGGER (schriftl. Mitteilung) maß in Anbausystem im Norden Ghanas Aktivitäten von 26-84 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (0-10 cm Bodentiefe).

Die Varianzanalyse zeigt ein ähnliches Bild wie bei der sauren Phosphatase, wobei der Faktor "Bodentiefe" ein stärkeres Gewicht besitzt als der Faktor "Brachealter" (siehe Anhang 6a). Wie bei der sauren Phosphatase liegt eine Interaktion beider Faktoren vor, was analog bedeutet, daß auch hier die Veränderung der Aktivitäten über die Zeit für jede Bodentiefe isoliert betrachtet werden müssen.

Die Aktivität der basischen Phosphatase nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. Sie beträgt in 0-5 cm Bodentiefe im Mittel aller Bracheflächen der Chronosequenz *Cumarú* 79 $\mu\text{g NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in 5-20 cm 24 (15-34) und in 20-50 cm Bodentiefe 20 (8-33) $\mu\text{g NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$.

In der Bodentiefe 0-5 cm weist die basische Phosphatase eine enge Korrelation ($r = 0,8307^{***}$) mit dem Brachealter auf (Tabelle 22). In größerer Bodentiefe ist keine Zunahme mit dem Alter nachweisbar.

Abhängigkeit der basischen Phosphatase von chemischen Bodenparametern

Die Aktivität der basischen Phosphatase ist vor allem an den Kohlenstoffgehalt im Boden gebunden und ist in geringerem Maße vom pH-Wert abhängig als die saure Phosphatase. Das zeigt das Ergebnis einer multiplen Regression mit C_{org} , dem pH-Wert und P_i als unabhängige Variablen (Tabelle 24). Daß die basische Phosphatase in engerer Beziehung zur mikrobiellen Biomasse steht als die saure Phosphatase - wie von verschiedenen Autoren geäußert - kann nicht bestätigt werden. So ist die induzierte mikrobielle Respiration gar mit der sauren Phosphatase besser korreliert als mit der basischen Phosphatase (Anhang 11).

Tabelle 24 Zusammenfassung einer multiplen Regression für die Aktivität der basischen Phosphatase als abhängige Variable in allen Altersstufen der Brache in der Chronosequenz *Cumarú* (Bodentiefe 0-5 cm) (n=20)

	partieller Regressions- koeffizient (β)	Standard- fehler β	B	Standard- fehler B	t(n)	Signifikanz- niveau
Interzept			89,014	50,6	1,759	0,098
C_{org} (g kg ⁻¹)	0,606	0,157	72,736	18,9	3,847	0,001
pH(CaCl ₂)	-0,350	0,168	-18,926	9,1	-2,084	0,054
P_i (mg kg ⁻¹)	-0,094	0,153	-3,248	5,3	-0,613	0,548

R= 0,8328 R²= 0,6936 korrigiertes R²= 0,636
F(3,16)=12,075 Standardfehler: 21,991

Urease

Die Urease ist agronomisch von besonderer Bedeutung, da sie die Hydrolyse von Harnstoff zu Ammonium und Kohlendioxid katalysiert. Insbesondere bei hohen pH-Werten kann es so nach einer Düngung mit Harnstoff zu erheblichen N-Verlusten durch NH₃-Volatilisierung kommen (ERNST & MASSEY 1960).

Die Ergebnisse der Varianzanalyse mit der Urease-Aktivität als abhängiger Variable zeigen wie bei der Phosphatase-Aktivität eine signifikante Abhängigkeit sowohl vom Brachealter, der Bodentiefe als auch von der Interaktion beider Faktoren (Anhang 6b).

Aktivitätsniveau

Die in den Maniokflächen gemessene Urease-Aktivität weist ganz unterschiedliche Niveaus auf: in der Chronosequenz *Marcelino* 13,1 µg N g⁻¹ 2h⁻¹, in *Cumarú* und *Gonzaga* 22,3 bzw. 30,3 µg N g⁻¹ 2h⁻¹, in *Iracema (Lucas)* 29,6 µg N g⁻¹ 2h⁻¹. In den 4- bis 8-jährigen Brache-

flächen wurden in Igarapé Açu Aktivitäten von 21,6-33,1 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$, in Iracema von 31,3-36,7 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ gemessen. Die Waldfläche der Chronosequenz *Marcelino* zeigt mit 39,7 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ die höchsten gemessenen Aktivitäten.

Die Aktivität der Urease nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. Sie beträgt im Durchschnitt der 5 Bracheflächen in *Cumarú* in 0-5 cm Bodentiefe 27,9 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ (22,3-36,5), in 5-20 cm 19,9 (18,0-26,2) und in 20-50 cm Bodentiefe 7,0 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ (5,1-8,7). Die gleiche Tendenz zeigt sich in den Chronosequenzen *Gonzaga* und *Lucas*, wo die Aktivitäten in 10-20 cm Bodentiefe im Mittel um 38 bzw. 28 % gegenüber der Bodentiefe 0-10 cm geringer sind (19,8 gegenüber 32,0 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ bzw. 23,4 gegenüber 32,5 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$).

Korrelationen mit dem Brachealter

Die Aktivität der Urease zeigt in der obersten Bodenschicht in drei der vier Chronosequenzen (Ausnahme ist *Gonzaga*) eine enge positive Korrelation mit dem Brachealter (Tabelle 22). In den tiefer liegenden Bodenschichten besteht kein Zusammenhang. In der Streuaufgabe weist die Urease-Aktivität mit $r = -0,619^{**}$ eine ins Negative verkehrte Korrelation auf.

Abhängigkeit der Urease von chemischen Bodenparametern

Was die Abhängigkeit der Aktivität von chemischen Bodenparametern während der Brachephase anbelangt, zeigt die Urease keine eindeutigen Tendenzen. Schon FENN et al. (1992) konstatierten, daß in ihren Untersuchungen nahezu jeder einzelne Bodenparameter einen Einfluß auf die Urease-Aktivität hatte. Am häufigsten liegt eine positive Korrelation mit dem C_{org} und N_{T} -Gehalt des Bodens vor (FRANKENBERGER & DICK 1983; REYNOLDS et al. 1985), wobei PANCHOLY & RICE (1973) mutmaßen, daß die Höhe der Urease-Aktivität von der Art der organischen Substanz abhängt. Sowohl ZANTUA & BREMNER (1976) als auch MCCARTY & BREMNER (1991) konnten mit Hilfe von Laborversuchen nachweisen, daß leicht abbaubares organisches Material stimulierend auf die Aktivität der Urease wirkt.

β -Glucosidase und Dehydrogenase

Das Aktivitätsniveau der β -Glucosidase liegt am Standort Igarapé Açu zwischen 21,8 und 38,2 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in Iracema bei 20,5 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Die Dehydrogenase zeigt in der Chronosequenz *Marcelino* Aktivitäten von 22,1-35,7 $\mu\text{g INTF g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$, in *Cumarú* von 71-118 $\mu\text{g INTF g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$.

Im Bodenprofil nimmt die Aktivität der β -Glucosidase mit zunehmender Bodentiefe z.T. deutlich ab. Die Aktivitäten liegen in 0-5 cm Bodentiefe im Mittel bei 31,4 (23,2-38,2 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$), in 5-20 cm bei 11,3 (8,8-16,4 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) und in 20-50 cm Bodentiefe bei 4,2 (2,1-6,4) $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (*Cumarú*). Das gleiche gilt für die Dehydrogenase, deren Aktivität während der Brachephase in 0-5 cm Bodentiefe im Mittel 86, in 5-20 cm 43 und in 20-50 cm 16 $\mu\text{g INTF g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ beträgt.

Im Auflagehorizont beträgt das Niveau der β -Glucosidase-Aktivität im Mittel 115 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ und ist somit deutlich höher als im Mineralboden.

Die Aktivitäten der β -Glucosidase und der Dehydrogenase zeigen die geringste Abhängigkeit von der Brachedauer (Abbildung 7 d,e). Lediglich die 30-jährige Brachefläche hat in *Cumarú* in 0-5 cm Bodentiefe ein signifikant höheres Niveau gegenüber allen anderen Flächen (Dehydrogenase) bzw. gegenüber der Maniokfläche (β -Glucosidase). Wo die Varianzanalyse bei der Dehydrogenase-Aktivität noch eine signifikante ($p = 0,01$) Abhängigkeit vom Brachealter zeigt (Anhang 6d), so wird bei der β -Glucosidase kein signifikanter Effekt des Brachealters mehr ausgewiesen (Anhang 6c). Zum gleichen Ergebnis kommt die Korrelationsanalyse (Tabelle 22). Lediglich die Bodentiefe sowie die Interaktion beider Faktoren haben einen signifikanten Effekt auf die Aktivität dieser beiden Enzyme.

Eine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang die Chronosequenz *Gonzaga* dar, für die in 0-10 cm Bodentiefe mit $r = -0,608^{***}$ eine negative Korrelation zwischen der β -Glucosidase-Aktivität und dem Brachealter errechnet wurde (Tabelle 22).

Auch in der Streuauflage in *Cumarú* nimmt die Aktivität der β -Glucosidase mit zunehmendem Brachealter ab ($r = -0,810^{***}$; Tabelle 22).

Cellulase

Die in der Chronosequenz *Marcelino* ermittelte Cellulase-Aktivität zeigt - betrachtet man die arithmetischen Mittel der Altersstufen der Brache - eine eindeutige Zunahme mit dem Brachealter (Tabelle 20). Das Aktivitätsniveau liegt zwischen 169 und 458 $\mu\text{g GLC g}^{-1} 24\text{h}^{-1}$. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Cellulase-Aktivität und dem Brachealter ist mit $r = 0,480$ (ns) jedoch sehr niedrig (Tabelle 22), was auf die große Streuung der Feldwiederholungen zurückzuführen ist (Variationskoeffizient = 18-79 %). Aus diesem Grund und wegen analytischer Probleme ist auf eine Bestimmung im weiteren Verlauf der Untersuchungen verzichtet worden.

Aryl-Sulfatasen

Die Aryl-Sulfatase zeigt wie die saure Phosphatase eine zunehmende Aktivität mit der Dauer der Brache (Abbildung 7f; Tab. 20), was sich sowohl in der Varianz- (s. Anhang 6e) als auch in der Korrelationsanalyse ($r = 0,7374^{***}$; Tabelle 22) äußert.

Das Aktivitätsniveau in der Chronosequenz *Cumarú* (0-5 cm Bodentiefe) liegt zwischen 31,7 und 74,7 $\mu\text{g p-NP g}^{-1}\text{h}^{-1}$.

2.2.2 Mikrobielle Biomasse

Mikrobieller Biomasse-Kohlenstoff (C_{mik})

Die in der Chronosequenz *Cumarú* ermittelten Gehalte an Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) lagen in 0-5 cm Bodentiefe zwischen 47 und 167 mg C kg^{-1} , in 5-20 cm zwischen 69 und 203 mg C kg^{-1} Boden (Abbildung 10, Tabelle 25).

Verglichen mit Daten von FEIGL et al. (1995), ebenso im Norden Brasiliens erhoben, sind die gemessenen C_{mik} -Konzentrationen außerordentlich niedrig. Die Autoren fanden in Oxisols in einer Bodentiefe von 0-10 cm (Manaus/Amazonas sowie Paragominas/Pará) 890-1100 mg C kg^{-1} , in Ultisols und Alfisols (Rondônia) 340-470 mg C kg^{-1} bzw. 580 mg C kg^{-1} Boden. Die C-Gehalte lagen in der gleichen Reihenfolge bei 2,53-3,33, 1,01-1,27 bzw. 1,96 %, der pH(H_2O) bei 3,62-4,54, 5,65-6,12 sowie 5,54. Zur Analyse wurde die Fumigations-Extraktions-Methode verwendet, zur Berechnung der C_{mik} -Konzentrationen spezifische k-Faktoren mittels einer ^{14}C -Markierung der Mikroorganismen bestimmt.

Am ehesten vergleichbar sind die Bodenverhältnisse in unserem Untersuchungsgebiet (Igarapé Açu) wohl mit den Ultisols in Rondônia: sowohl der C-Gehalt im Boden als auch der pH(H_2O) liegen in derselben Größenordnung (vgl. IV 2.1).

Auch HENROT & ROBERTSON (1994) fanden in einer 20-jährigen Sekundärvegetation in Costa Rica ('La Selva') mit 762-2386 mg C kg^{-1} deutlich höhere C_{mik} -Gehalte. Auch sie verwendeten ninhydrin-reaktiven Stickstoff, jedoch, AMATO & LADD (1988) folgend, mit einem Konversionsfaktor zur Umwandlung der Differenz aus ninhydrin-reaktivem Stickstoff der begasten und der nicht-begasten Proben (E_{nin}) in den C_{mik} -Gehalt von 21. Die Kohlenstoffgehalte waren auch auf diesen Standorten mit 2,62 und 4,53 (%) relativ hoch, der pH lag bei 4,98 bzw. 6,45.

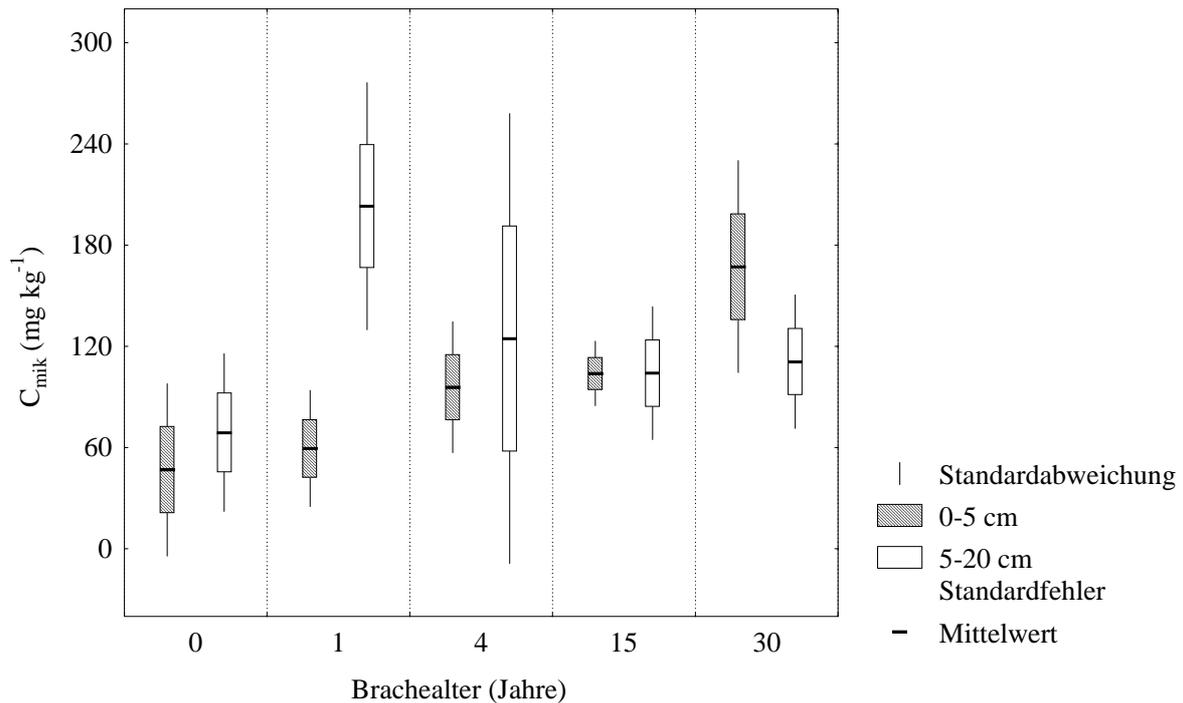


Abbildung 10 Die Gehalte an mikrobiellem Biomasse-C im Boden in Abhängigkeit vom Alter der Brachevegetation und der Bodentiefe (0-5 und 5-20 cm), Chronosequenz *Cumarú* (n=4)

Bei unseren Berechnungen wurde als Konversionsfaktor 22,0 verwendet. Dieser Faktor wird von JÖRGENSEN (1994) für Böden mit einem $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) > 5,0$ empfohlen. Der Autor weist die Bedeutung des pH-Wertes für die Berechnung von E_{nin} in C_{mik} nach. Es stellt sich die Frage, ob nicht genau genommen ein Vergleich von Flächen mit unterschiedlichem pH einer jeweilige Korrektur des Konversionsfaktors bedarf, anstatt diesen konstant zu lassen bzw. wie JÖRGENSEN (1994) verschiedene Faktoren für zwei pH-Bereiche anzugeben. Theoretisch würde der im Zeitverlauf der Brache abnehmende pH eine schrittweise Erhöhung des Konversionsfaktors erfordern, was in diesem Fall eine Verstärkung des ohnehin schon nachgewiesenen Anstiegs der C_{mik} -Konzentration bewirken würde. Auf diese Weise bekämen die C_{mik} -Gehalte in den älteren Bracheflächen ein noch höheres Niveau. An der Tatsache, daß mit zunehmendem Brachealter der C-Gehalt in der mikrobiellen Biomasse ansteigt, würde sich folglich nichts ändern.

Korrelationen mit dem Brachealter

Die Korrelation mit dem Brachealter ist in der Bodentiefe 0-5 cm hoch signifikant ($r = 0,71117^{***}$), in 5-20 cm nicht signifikant (Tabelle 26). Gleiches gilt für das $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis (Anteil des Biomasse-C am Gesamt-C-Gehalt des Bodens). Dieser soll ein Indikator für die mikrobielle Verfügbarkeit der organischen Substanz sein (INSAM & DOMSCH

1988). Auch nach Ansicht von JÖRGENSEN (1994) deutet ein Prozentsatz $<1,2\%$ auf einen gehemmten Umsatz der organischen Substanz hin. Ob dieser Grenzwert auf die in den hier vorliegenden Böden herrschenden Bedingungen anwendbar ist, ist jedoch mehr als fraglich. Denn vergleicht man beide Bodentiefen in *Cumarú* miteinander, so würden die geringeren $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Werte von 0,43-1,06 in 0-5 cm gegenüber 1,10-2,84 in 5-20 cm Bodentiefe auf eine höhere C-Verfügbarkeit in der tieferen Bodenschicht hindeuten. Dieses aber würde der gängigen Lehrmeinung widersprechen, daß in tropischen Böden der C-Umsatz in Oberflächennähe am größten ist. FEIGL et al. (1995) fanden in den Ultisols in Rondônia $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Werte von 2,7-2,9 % (nach Daten der Autoren berechnet).

Tabelle 25 Mikrobielle Biomasse und mikrobielle Respiration in der Chronosequenz *Cumarú*

	C_{mik} mg kg ⁻¹	$C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ · 100 %	P_{mik} mg kg ⁻¹	$P_{\text{mik}}/P_{\text{t}}$ · 100 %	$P_{\text{mik}}/P_{\text{i}}$	$C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$	CO _{2i} mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹	qCO _{2i} mg CO ₂ h ⁻¹ mg C _{mik} ⁻¹
Bodentiefe 0-5 cm								
Maniokfläche	47	0,43	11,6	7,0	2,5	3,7	3,8	10,85
1-j. Brache	59	0,51	11,5	5,7	3,1	5,1	4,3	0,88
4-j. Brache	96	0,84	16,0	8,0	4,0	5,9	4,2	0,48
15-j. Brache	104	1,06	12,0	7,2	3,7	8,8	4,8	0,47
30-j. Brache	167	1,06	18,5	3,9	5,6	8,9	7,2	0,47
Bodentiefe 5-20 cm								
Maniokfläche	69	1,10	9,9	7,2	4,5	7,2	2,1	0,73
1-j. Brache	203	2,84	9,3	4,7	4,7	21,6	2,5	0,13
4-j. Brache	125	1,79	8,4	4,2	4,2	14,7	2,2	0,36
15-j. Brache	104	1,47	7,7	3,9	3,9	13,3	2,0	0,19
30-j. Brache	111	1,57	6,9	1,6	3,5	16,1	1,4	0,14

Das Ansteigen von $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ im Verlauf der Brache widerspricht Ergebnissen von INSAM & DOMSCH (1988), die eine enge negative Korrelation zwischen dem Alter einer Waldsukzession und $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ nachweisen konnten. Ihre Interpretation dieses Zusammenhanges ist die, daß der Wald mit der Zeit einen gewissen "Reifegrad" erreicht, sprich einen metabolischen Gleichgewichtszustand, was sich dahingehend äußert, daß sich der Abbau verfügbarer organischer Substanz primär im Auflagehorizont vollzieht. Konsequenz ist, nach

INSAM & DOMSCH (1988), daß der C_{mik} -Anteil an der organischen Substanz im Mineralboden alter Waldstandorte relativ gering ist.

Augenfälligster Unterschied zu unserer Bodenbeprobung ist die Tatsache, daß INSAM & DOMSCH (1988) die Bodenschicht von 0-15 cm beprobten, im Gegensatz zu unseren 0-5 cm. Der Anteil oberflächenfernen Mineralbodens ist also bei ihnen deutlich höher, wodurch die Streuauflage einen geringeren Einfluß auf den Mineralboden hatte als bei unseren Untersuchungen. So gesehen verhält sich die Bodenschicht 0-5 cm deutlich in Funktion der metabolischen Prozesse in der Streuauflage, deren Quantität mit dem Alter der Brache zunimmt. Die Phytomasse der Streuauflage stieg in *Cumarú* von 3,7 t ha⁻¹ in der einjährigen Brache über 9,9 t ha⁻¹ in der 4-jährigen Brache, 10,1 t ha⁻¹ in der 15-jährigen Brache auf 13,0 t ha⁻¹ in der 30-jährigen Brache an.

Tabelle 26 Korrelationen (Pearson) zwischen der mikrobiellen Biomasse und Respiration und dem Alter der Brache in den Chronosequenzen *Cumarú* (n=20)

	C_{mik}	$C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ · 100	P_{mik}	$P_{\text{mik}}/P_{\text{t}}$ · 100	$P_{\text{mik}}/P_{\text{i}}$	$C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$	CO ₂ i	qCO ₂ i
0-5 cm	0,712***	0,529**	0,598**	-0,547*	0,60*	0,6037*	0,878***	-0,270 ns
5-20 cm	-0,118 ns	-0,131 ns	-0,682***	-0,762***	-0,584**	0,0675 ns	-0,546*	-0,274 ns

Mikrobieller Biomasse-Phosphor (P_{mik})

Die Gehalte an Phosphor in der mikrobiellen Biomasse (P_{mik}) lagen in der Bodentiefe 0-5 cm zwischen 11,6 und 18,5 mg P kg⁻¹ Boden (Abbildung 11, Tabelle 25). Die 15-jährige Brache wies dabei mit 12,0 mg P kg⁻¹ vergleichsweise geringe Werte auf, was u.U. damit zusammenhängt, daß die Vegetationszusammensetzung auffallend anders geartet war. Es dominierte die Strelitziaceae *Phenakospermum guyannense* ("Sororoca"), die aufgrund ihres Habitus (große, bananenartige Blätter, die das Regenwasser regelrecht kanalisieren) eine weitreichende Bedeutung für die bodenchemischen Charakteristika haben (HÖLSCHER 1995).

In 5-20 cm Bodentiefe liegen die P_{mik} -Gehalte zwischen 6,9 und 9,9 mg kg⁻¹.

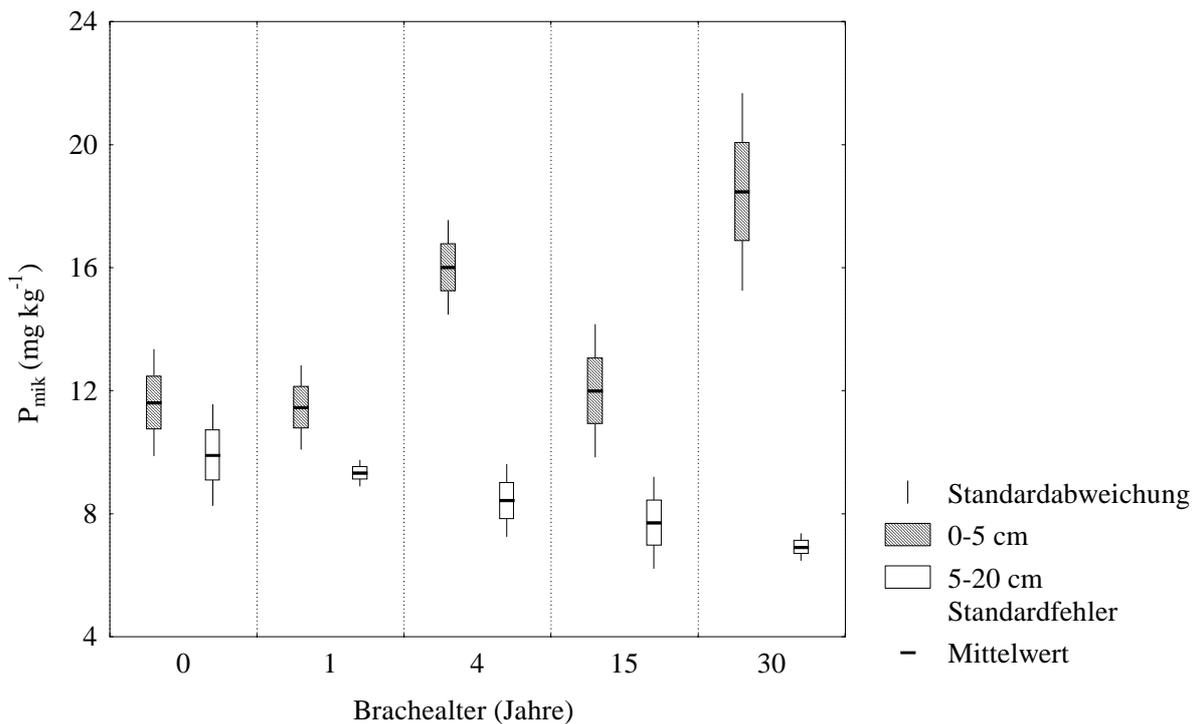


Abbildung 11 Die Gehalte an mikrobiellem Biomasse-P im Boden (0-5 und 5-20 cm) in Abhängigkeit vom Alter der Brachevegetation und der Bodentiefe, Chronosequenz *Cumarú* (n=4)

Im Vergleich zu Untersuchungen in den gemäßigten Breiten, muß das Niveau der P_{mik} -Gehaltes als gering eingestuft werden. JÖRGENSEN et al. (1995) fanden an 38 Waldstandorten (von Rotbuche dominiert) in Norddeutschland in 0-10 cm Bodentiefe Konzentrationen von 17,7 bis 174,3 mg P kg⁻¹ Biomasse-P. Sie sind also im Durchschnitt weit höher als die in der Chronosequenz *Cumarú* nachgewiesenen Gehalte.

In der Bodentiefe 0-5 cm wurde für P_{mik} mit $r = 0,5975^{**}$ eine positive, signifikante Korrelation mit dem Brachealter errechnet. Die P_{mik} -Konzentration nimmt also wie bei C_{mik} mit dem Alter der Brache zu.

In der Bodentiefe 5-20 cm konnte mit $r = -0,6815^{***}$ ein signifikanter, negativer Zusammenhang nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur oberen Bodenschicht nimmt also die P_{mik} -Konzentration in 5-20 cm Bodentiefe im Verlauf der Brache ab.

Der P_{mik} -Anteil am Gesamt-P-Gehalt des Bodens ($P_{\text{mik}} \cdot 100/P_{\text{t}}$) liegt in 0-5 cm Bodentiefe zwischen 1,6-8,0 %, was verglichen mit Waldböden in den gemäßigten Breiten ein niedriges Niveau ist (JÖRGENSEN 1995). Es scheint keinerlei Abhängigkeit vom Brachealter vorzuliegen, was u.U. auch auf die fehlende Genauigkeit der P_{t} -Analytik zurückzuführen ist. Weit deutlicher wird die Bedeutung des P_{mik} -Pools, berechnet man den $P_{\text{mik}}/P_{\text{t}}$ -Quotienten. Dieser steigt in 0-5 cm Bodentiefe von 2,5 in der Maniokfläche auf 5,6 in der 30-jährigen Brache-

fläche an, also auf mehr als das Doppelte. Der relativ geringe Wert in der 15-jährigen Brache ist auf die geringe P_{mik} -Konzentration in dieser Fläche zurückzuführen (vgl. Tabelle 20). In 5-20 cm Bodentiefe nimmt der P_{mik}/P_i -Quotient tendenziell mit der Brachedauer ab, wobei die Variationsbreite mit 3,5-4,7 deutlich kleiner ist als in der darüberliegenden Bodenschicht.

Der $C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$ -Quotient steigt in 0-5 cm Bodentiefe im Verlauf der Brache von 3,7 auf 8,9. Dieses relativ niedrige Niveau deckt sich mit der Beobachtung von JÖRGENSEN (1994), daß in sauren Böden der Quotient oftmals klein ist, bedingt zum Teil dadurch, daß der Anteil an Pilzen zunimmt aber auch durch eine abnehmende C-Verfügbarkeit. Ob diese, in den gemäßigten Breiten gemachte Beobachtung auf tropische Bedingungen übertragen werden kann, bleibt dahingestellt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß C_{mik} und P_{mik} in 0-5 cm Bodentiefe sowohl was ihre Konzentrationen anbelangt als auch relativ in bezug auf die C- bzw. P_i -Gehalte im Verlaufe der Brachedauer an Bedeutung gewinnen. In 5-20 cm Bodentiefe zeigt C_{mik} keinerlei Abhängigkeit von der Brachedauer, die Bedeutung von P_{mik} geht dagegen tendenziell mit dem Alter der Brache zurück.

2.2.3 Mikrobielle Respiration

Die mikrobielle Respiration wurde ausschließlich in der Chronosequenz *Cumarú* als substrat-induzierte Bodenatmung bestimmt. Sie betrug in 0-5 cm Bodentiefe zwischen 3,8 mg CO₂ 100 g⁻¹ h⁻¹ in der Maniokfläche und 7,2 mg CO₂ 100 g⁻¹ h⁻¹ in der 30-jährigen Brache. In 5-20 cm Bodentiefe war die mikrobielle Respiration mit 1,4 - 2,5 mg CO₂ 100 g⁻¹ h⁻¹ deutlich geringer.

In 0-5 cm Bodentiefe steigt die Respiration mit der Brachedauer an, in 5-20 cm nimmt sie tendenziell ab (Abbildung 12). Dieser Zusammenhang spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Korrelationsanalyse wider. Die Korrelationskoeffizienten wurden mit $r = 0,8781^{***}$ bzw. $r = -0,5459^*$ errechnet (Tabelle 26).

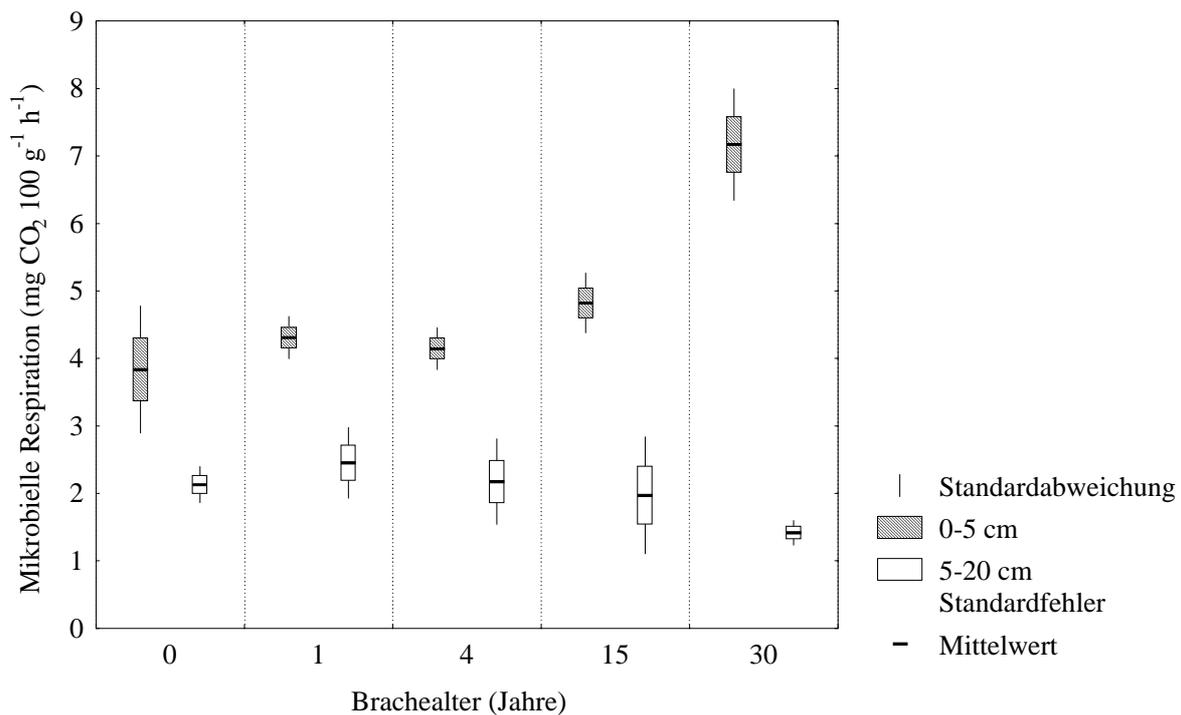


Abbildung 12 Die substrat-induzierte Respiration im Boden in Abhängigkeit vom Alter der Brachevegetation und der Bodentiefe (0-5 und 5-20 cm) (n=4)

2.2.4 Aktive mikrobielle Biomasse ($q\text{CO}_2$)

ANDERSON & DOMSCH (1990) führten die sog. aktive mikrobielle Biomasse $q\text{CO}_2$ ein, auch 'metabolischer Quotient' genannt, der sich aus der basalen Respiration und C_{mik} errechnet (Tabelle 25). Dieser Ansatz basiert auf der Ökosystem-Theorie von ODUM (1969). Wissenschaftliche Arbeiten haben gezeigt (INSAM & HASELWANDTER 1989, SPARLING 1991), daß ein Ansteigen von $q\text{CO}_2$ auf eine Zunahme der metabolischen Aktivität hindeutet. Mögliche Ursache ist eine bessere Substratverfügbarkeit oder ganz allgemein Streß. Der Umbruch einer Brachevegetation ist in diesem Zusammenhang als ein recht massiver und extremer Eingriff zu werten, da sehr plötzlich eine große Menge an Substrat (ober- und unterirdisch) zur Verfügung steht. Es hat sich gezeigt, daß $q\text{CO}_2$ sowohl während der Primär- (INSAM & HASELWANDTER 1989) als auch der Sekundärsukzession (SANTRUCKOVA 1992) abnimmt. Trotz einiger kritischer Reflektionen (WARDLE 1993; WARDLE & GHANI 1995) scheint $q\text{CO}_2$ also ein durchaus brauchbarer Indikator für das metabolische Gleichgewicht im Boden eines Ökosystems zu sein.

Da die Bodenproben der Chronosequenz *Cumarú* ausschließlich auf die substrat-induzierte Respiration hin analysiert wurden, ist diese zur Berechnung des Quotienten herangezogen worden. Dieses Vorgehen erscheint legitim, da ein linearer Zusammenhang zwischen der basalen und der induzierten mikrobiellen Respiration besteht. Eine Gegenüberstellung der

Quotienten, berechnet aus beiden Formen der Respiration, zeigte vergleichbare Resultate (Daten hier nicht dargestellt). Ein Vergleich der mit der substrat-induzierten Respiration errechneten Werte mit Literaturdaten macht selbstverständlich wenig Sinn.

Der Wert dieses Quotienten - der Form halber an dieser Stelle $q\text{CO}_2\text{i}$ genannt - ist in der Maniokfläche in 0-5 cm Bodentiefe deutlich, und zwar mit dem Faktor 10-20, gegenüber den Bracheflächen erhöht, d.h. die metabolische Aktivität ist hoch. Der Quotient nimmt zu Beginn der Brachephase rasch ab und erreicht in der 4-jährigen Brachefläche bereits ein Niveau, das sich in den älteren Brachen nicht mehr verändert. So überrascht es nicht, daß die Korrelation zwischen $q\text{CO}_2\text{i}$ und dem Brachealter nicht signifikant ist, was sich mit Daten von INSAM & DOMSCH (1988) deckt. Der Zusammenhang könnte mit einem nicht-linearen Modell besser beschrieben werden.

Zusammenfassend (und unter Vorbehalt, da CO_2i verwendet wurde) läßt sich feststellen, daß sich zwischen einem und vier Jahren Brache ein metabolisches Gleichgewicht im Boden einstellt, welches die vom Kulturpflanzenanbau ausgehende Störung des Agrarökosystems überwunden hat.

2.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Brachephase

Der Verlauf der Brachephase zeichnet sich durch die folgenden Veränderungen der Bodeneigenschaften (im Oberboden) aus:

- (a) Zunahme der Bodenazidität ($\text{pH} \downarrow$, $\text{H}^+ \uparrow$, $\text{Al}^{3+} \uparrow$)
- (b) Abnahme der Konzentrationen basischer Kationen ($\text{Ca} \downarrow$, $\text{K} \downarrow$, Basensättigung \downarrow)
sowie der P_i -Konzentration
- (c) Anstieg der C_{org} -, N_t - und P_t -Gehalte, jedoch erst in alten Brachen (ab ca. 20 Jahre)
- (d) Anstieg der Aktivitäten der sauren und basischen Phosphatase und der Urease
- (e) Zunahme der absoluten Gehalte des mikrobiellen Biomasse-C und -P sowie deren relativer Bedeutung gegenüber C_{org} bzw. P_i in der obersten Bodenschicht, gegenläufige Tendenz in der darunterliegenden Bodenschicht
- (f) Zunahme der mikrobiellen Respiration in der obersten Bodenschicht, gegensätzliche Tendenz in der darunterliegenden Bodenschicht

Mit zunehmender Brachedauer findet eine Konzentrierung mikrobieller Aktivitäten und Gehalte in Richtung auf die Bodenoberfläche statt (saure Phosphatase, C_{mik} , P_{mik}). Weder C_{org} noch N_t sind geeignete Indikatoren für die Beurteilung der Produktivität eines Standortes, geschweige denn für die Evaluierung von Nutzungs- und Anbausystemen hinsichtlich deren Nachhaltigkeit, da erst langfristig Veränderungen auftreten. Der von AHN (1979; vgl. Kapitel II) als fundamentale Funktion der Brache bezeichnete Anstieg der organischen Substanz kann

für die hier untersuchten jungen Brachen nicht bestätigt werde, sondern gilt nur für alte Brachen (s. IV 2.1).

Es stellt sich nun die Frage nach der Charakterisierung dieses Brachesystems. Die Veränderung der Bodeneigenschaften lassen sich folgendermaßen resümieren:

- (a) Versauerung
- (b) Verarmung an anorganischen Bioelementen und basischen Kationen
- (c) Zunahme mikrobiell und organisch gebundener Bioelemente (C, P, N) sowie des biologischen Aktivitäts-Potentials

Die Zunahme der Azidität mit u.U. auftretender Al-Toxizität sowie die Abnahme des Gehaltes an basischen Kationen sind typische Indikationen für eine rückläufige Bodenproduktivität. Im Gegensatz dazu steht die Zunahme mikrobiell und organisch gebundener Bioelemente, die potentielle Nährstoffquellen für eine spätere landwirtschaftliche Nutzung darstellen. Kurzfristig sind diese jedoch sicher nicht in vollem Umfang verfügbar, so daß die Bedingungen im Boden der Brachephase für eine unmittelbare landwirtschaftliche Nutzung als mangelhaft zu bezeichnen sind. Der Boden des Brachesystems kann kein Maßstab sein, mit dem man die Veränderungen der Bodeneigenschaften während der Anbauphase beurteilen könnte.

UHL & JORDAN (1984, Zentral-Amazonien) berichten, daß sich das Nährstoffniveau im Boden nach 5 Jahren Brache (natürliche Sukzession) nicht mehr von dem eines Primärwaldes unterschied, was sie auf den kombinatorischen Effekt von Nährstoff-Auswaschung und Nährstoff-Akkumulierung in der Vegetation zurückführen. Es wurden jedoch nur Calcium, Magnesium, Kalium sowie Nitrat untersucht.

Betrachtet man das Gesamtsystem, also die Vegetation und den Boden gemeinsam, so läßt sich konstatieren, daß es zu einem Bioelementfluß von anorganischen in organische Pools kommt: a) in die mikrobielle Biomasse des Bodens und b) in die Brachevegetation. Nach BROWN & LUGO (1990) ist in Sekundärwaldflächen die P_i -Konzentration in der Vegetation höher als im Boden. Bei Gesamt-Stickstoff und Gesamt-Phosphor ist das Verhältnis umgekehrt, für Calcium, Kalium und Magnesium wurde keine einheitliche Tendenz festgestellt.

Die Einbindung von Nährstoffen in die organischen Kompartimente macht das eigentliche Potential des Brachesystems aus. Deren Mobilisierung erfolgt im Moment der Inkulturnahme (a) durch die Mineralisierung organisch und mikrobiell gebundener Bioelemente im Boden und (b) durch die Rückführung der in der Brachevegetation gebundenen Bioelemente. Im traditionellen Anbau erfolgt diese Rückführung durch das Kahlschlagen und Brennen der Brachevegetation. Ihr kommt eine Schlüsselfunktion für die nachhaltige Produktivität des Nutzungssystems zu (s. IV 3).

3 Die Anbauphase des traditionellen Anbausystems

Die in Kapitel IV 2 präsentierten Ergebnisse lassen bereits einen groben Vergleich von Brache- und Anbauphase zu. Es darf jedoch nicht außer acht gelassen werden, daß es sich bei den in den Chronosequenzen untersuchten Anbauflächen um Flächen handelte, die von den Bauern bewirtschaftet wurden. Hierbei hatten wir keinen Einfluß auf die Ausführung der Kulturarbeiten, die größtenteils bereits durchgeführt worden waren. In dem vorliegenden Kapitel wurden nun Flächen untersucht, die fast ausschließlich Teil der Feldversuche waren, also unter der Obhut der Mitarbeiter des Projektes standen. Vergleicht man diese Flächen mit jenen der Bauern, so unterschieden sie sich vor allem darin, daß sie (a) eine höhere Bestandesdichte von Mais und Maniok aufwiesen und daß (b) häufiger gehackt wurde. Da die in den Feldversuchen erzielten Erträge relativ hoch waren, muß man davon ausgehen, daß die Anbaubedingungen im Vergleich zu den Bauernfeldern günstiger waren (siehe auch IV 1).

Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Veränderungen der chemischen und biologischen Bodenparameter im Verlauf der Anbauphase dargestellt. Der zweite Teil befaßt sich mit der Übergangphase vom Anbau zur Brache. Es wird eine Art Bilanzierung des Anbaueffektes durchgeführt.

3.1 Bodenchemische Veränderungen im Verlauf der traditionellen Anbauphase

pH-Wert

Wie bereits in IV 2.1 für die Brachephase dargestellt wurde, unterliegt der pH-Wert auch während der Anbauphase starken Fluktuationen (Abbildung 13, Tabelle 27). Das Brennen der Brachevegetation führt in Cumarú zu einem unmittelbaren, signifikanten Anstieg von $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ 4,60 auf 5,03, der Anstieg von $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 6,05 auf 6,28 ist dagegen nicht signifikant. Mit den im Dezember und Januar einsetzenden Regenfällen (vgl. III 6.1) kommt es zu einer weiteren Zunahme auf pH 5,65 bzw. 6,63. Im Verlauf des Mais- und Maniokanbaus nimmt der pH-Wert wieder ab - $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ fällt mit 6,06 wieder auf das alte Niveau zurück, $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ ist dagegen mit pH 4,93 weiterhin signifikant gegenüber der Ausgangssituation vor dem Brennen erhöht.

In Iracema ist das pH-Niveau durchweg geringer: $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ beträgt vor dem Brennen 4,24, $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 5,55 (Tabelle 28); nach dem Einsetzen der Regenfälle kommt es zu einem signifikanten Anstieg des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ auf 5,14 und des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ auf 6,42. Zum Zeitpunkt der Maniokernte bleibt der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ bzw. der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ mit 4,51 bzw. 5,73 gegenüber der Ausgangssituation erhöht (ns; Tabelle 28).

In 10-20 cm Bodentiefe sind die Veränderungen im Verlauf der Anbauphase geringer. Der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ bleibt an beiden Standorten konstant bei 4,1-4,2; $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ geht in Cumarú von 5,63 auf 5,26 zurück, in Iracema steigt er von pH 5,32 auf 5,54 an und fällt bei der Maniokernte auf pH 5,25 (Anhang 7).

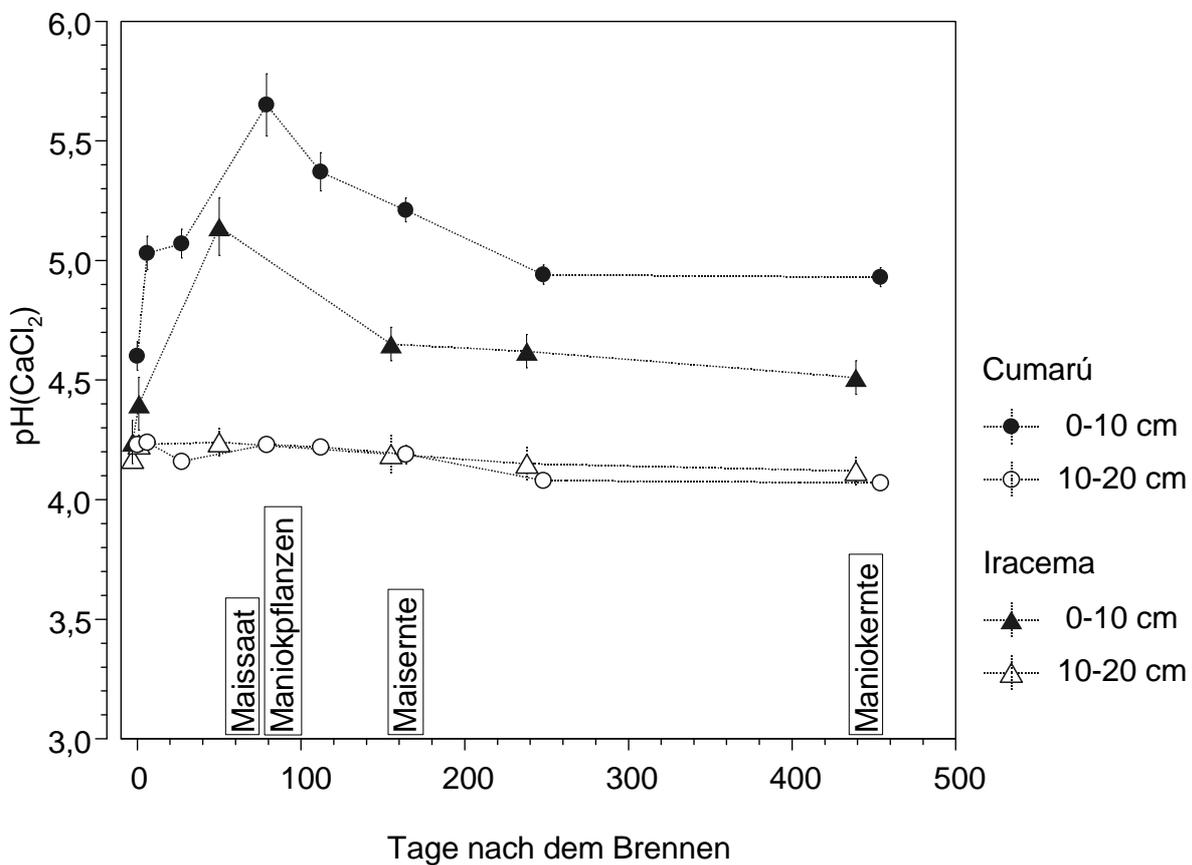


Abbildung 13 Veränderung des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ im Verlauf der traditionellen Anbauphase in Cumarú und Iracema, Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm (| = Standardfehler, n=7)

Tabelle 27 Biologische und chemische Parameter im Boden (0-10 cm) des traditionellen Anbausystems im Feldversuch Cumarú, Tukey-Test ($p < 0,05$)

Tage nach dem Brennen	0	6	27	79	112	164	248	454
	unmittelbar vor dem Brennen	nach dem Brennen	erste leichte Regenfällen	nach Maissaat und Maniokpflanzen, Beginn d. Regenzeit	männliche Maisblüte	Ernte Mais	Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	Ernte Maniok
pH(H ₂ O)	6,05 ab	6,28 bc	5,98 a	6,63 d	6,50 cd	6,32 c	6,03 a	6,06 ab
pH(CaCl ₂)	4,60 a	5,03 b	5,07 bc	5,65 d	5,37 cd	5,21 bc	4,94 b	4,93 b
C _{org} (g kg ⁻¹)	8,2 a	9,2 a	9,6 a	10,3 ab	9,4 a	10,2 ab	9,5 a	12,0 b
N _t (g kg ⁻¹)	1,0 ab	1,0 ab	1,0 ab	0,9 a	0,9 a	1,1 bc	0,9 a	1,2 c
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	3,7 a	5,7 ab	6,7 ab	18,1 d	11,7 c	8,4 bc	5,9 ab	5,1 ab
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,17 ab	1,36 bc	0,79 a	2,41 e	2,21 de	1,81 cd	1,79 cd	1,03 ab
Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,25 a	0,27 a	0,36 a	0,44 a	0,37 a	0,81 b	0,47 a	0,33 a
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,069 a	0,134 c	0,163 d	0,127 c	0,094 b	0,061 a	0,069 a	0,053 a
Na ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,06 c	0,07 c	0,06 c	0,04 b	0,03 ab	0,03 a	0,03 a	-
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,9 d	2,7 cd	2,0 ab	2,1 abc	1,6 a	1,6 a	2,2 abc	2,2 bc
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	1,44 a	1,83 ab	1,37 a	3,03 d	2,71 cd	2,72 cd	2,35 bc	1,41 a
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	4,30 bc	4,49 cd	3,40 a	5,10 d	4,29 bc	4,27 bc	4,51 cd	3,63 ab
Basensättigung (%)	34 a	41 a	40 a	59 bc	64 c	64 c	52 b	39 a
saure Phosphatase	1020 c	1058 c	919 bc	602 a	558 a	656 a	752 ab	590 a
Urease	25,7 bc	28,0 c	28,1 c	15,3 a	15,4 a	20,7 ab	25,1 bc	30,3 c
β-Glucosidase	10,1 a	12,8 ab	14,6 abc	13,9 abc	14,3 abc	20,0 c	18,7 bc	32,2 d

¹ Rangtest zum Vergleich der einzelnen Probenahmeterminale innerhalb eines jeden Parameters

Tabelle 28 Biologische und chemische Parameter im Boden (0-10 cm) des traditionellen Anbausystems im Feldversuch Iracema, Tukey-Test ($p < 0,05$)

Tage nach dem Brennen	0	1	50	155	238	439
	unmittelbar vor dem Brennen	kurz nach dem Brennen	Beginn der Regenzeit, vor Maissaat	Ernte Mais	Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	Ernte Maniok
pH(H ₂ O)	5,55 a	5,68 a	6,42 b	5,79 a	5,77 a	5,73 a
pH(CaCl ₂)	4,24 a	4,40 ab	5,14 c	4,65 b	4,62 b	4,51 ab
C _{org} (g kg ⁻¹)	-	-	-	11,4 a	10,5 a	11,1 a
N _t (g kg ⁻¹)	-	-	-	1,1 ab	1,0 a	1,2 b
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	-	-	-	3,7 a	4,1 a	3,0 a
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	1,94 b	1,79 b	0,83 a
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,061 b	0,059 b	0,046 a
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,03 a	0,00 a	0,00 a
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	2,51 ab	2,94 b	2,44 a
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	2,04 b	1,88 b	0,88 a
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	4,58 b	4,82 b	3,32 a
Basensättigung (%)	-	-	-	45 b	39 b	27 a
saure Phosphatase	1730 c	1530 bc	1135 a	1248 ab	1286 ab	1026 a
Urease	-	-	-	22,4 a	23,5a	29,6 b
β-Glucosidase	19,4 ab	18,7 ab	12,3 a	16,0 ab	23,4 b	20,5 b

¹ Rangtest zum Vergleich der einzelnen Probenahmeterminale innerhalb eines jeden Parameters

In zahlreichen Publikationen wird von einem pH-Anstieg des Bodens nach dem Brennen von Brachevegetationen oder von Primärwald berichtet. So wiesen BRINKMANN & NASCIMENTO (1973) in Manaus, Zentral-Amazonien, einen pH(H₂O)-Anstieg um 0,6 pH-Einheiten in 0-20 cm Bodentiefe nach dem Brennen eines Primärwaldes nach. Der Boden, ein Latossolo amarelo (Oxisol), hatte dabei mit pH 3,6-4,1 vor dem Brennen ein extrem niedriges pH-Niveau, was den relativ geringen Effekt durch das Brennen einer so großen Phytomasse erklärt. Auch 8 Monate nach dem Brennen blieb das pH-Niveau deutlich erhöht. MARTINS et al. (1991) maßen auf einem Podzólico (Ultisol) in Ost-Amazonien (Capitão Poço, Pará), einen pH-Anstieg nach dem Brennen von pH 4,2-4,9 auf pH 6,7-7,2 im Oberboden. MARTINS et al. (1990b) berichten von demselben Standort, daß eine frisch gebrannte Fläche gegenüber dem Primärwald in 0-10 cm Bodentiefe einen um 2,5 Einheiten höheren pH aufwies. Die Aschemenge war bei jenen Untersuchungen mit 1,7 kg m⁻² um mehr als 20 mal höher als in Cumarú (DANTAS & MATOS, zit. in MARTINS et al. 1990b).

Kohlenstoff- (C_{org}) und Stickstoffgehalte (N_t)

Die Gehalte an C_{org} und N_t variieren im Verlauf der Anbauphase nur wenig (Tabelle 27 und Tabelle 28). Der C_{org}-Gehalt liegt in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe zwischen 8,2 und 10,3 g kg⁻¹, und steigt erst zum Zeitpunkt der Maniokernte auf 12,0 g kg⁻¹ an. In 10-20 cm Bodentiefe liegt der C_{org}-Gehalt zwischen 5,4 und 7,7 g kg⁻¹. In Iracema beträgt der C_{org}-Gehalt zum Ende der Anbauphase zwischen 10,5 und 11,4 g kg⁻¹ bzw. 6,8-7,4 g kg⁻¹.

Gesamt-N liegt in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe im Bereich zwischen 0,9 und 1,2 g kg⁻¹, in 10-20 cm zwischen 0,7 und 0,9 g kg⁻¹ (Tabelle 27); in Iracema zwischen 1,0 und 1,2 g kg⁻¹ bzw. zwischen 0,70 und 0,80 g kg⁻¹ (Tabelle 28). Die Stickstoffdüngung spiegelt sich nicht in den Gesamt-N-Gehalten wider.

CERRI et al. (1991) fanden bei Untersuchungen auf einem Latossolo amarelo (0-20 cm Bodentiefe) nahe Manaus (Zentral-Amazonien), eine 25 %-ige Reduzierung der organischen Substanz in den ersten zwei Jahren nach Umwandlung eines Primärwaldes in Weide. Erst nach 8 Jahren Weidenutzung wurde der vor dem Eingriff gemessene Ausgangsgehalt wieder erreicht.

In Untersuchungen in Ost-Amazonien (Capitão Poço, Pará) wurde in 0-15 cm Bodentiefe ein um 15 % geringerer C_{org}-Gehalt in einer gebrannten Fläche im Vergleich mit einem Primärwald nachgewiesen (MARTINS et al. 1990a), am selben Standort in 0-10 cm und 10-20 cm Bodentiefe ein Verlust von 17 % bzw. 10 % (MARTINS et al. 1990b). Es wird jedoch nicht gesagt, ob die Unterschiede statistisch signifikant sind.

Die Verluste an C_{org} und N_t nach Initialisierung einer landwirtschaftlichen Nutzung hängt nach BROWN & LUGO (1990) von dem Niveau des Ausgangsgehaltes ab. Ist der Gehalt an

organischer Substanz z.B. im Boden einer Brachevegetation relativ hoch, so ist auch mit hohen Verlusten nach dem Umbruch der Brachevegetation zu rechnen.

Phosphor

Die P_i -Gehalte in Cumarú liegen in 0-10 cm Bodentiefe zwischen 3,7 und 18,1 mg kg^{-1} und zeigen eine deutliche Dynamik in Abhängigkeit von den agronomischen Aktivitäten (Tabelle 27; siehe IV 4.1.1.1). In 10-20 cm Bodentiefe dagegen steigt die P_i -Konzentration während der Maiskultur nur geringfügig von 2,0 auf 3,4 mg kg^{-1} an und sinkt anschließend wieder auf die anfängliche Konzentration ab (Anhang 7a). In Iracema liegen die P_i -Gehalte in der zweiten Hälfte der Anbauphase zwischen 3,0 und 4,1 mg kg^{-1} (0-10 cm Bodentiefe) bzw. zwischen 1,4 und 2,7 mg kg^{-1} (10-20 cm Bodentiefe).

Basische Kationen

Kalium

Die gemessenen Kalium-Konzentrationen liegen in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe zwischen 0,053 und 0,163 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ (Tabelle 27), in 10-20 cm zwischen 0,034 und 0,091 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ (Anhang 7a). Besonders deutlich ist der Anstieg in 0-10 cm Bodentiefe direkt nach dem Brennen von 0,069 auf 0,134 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, was praktisch einer Verdopplung der Kalium-Konzentration gleichkommt. Die Zunahme der Kalium-Konzentration spiegelt in dieser Phase in 0-10 cm Bodentiefe scheinbar die direkte Aschedeposition wider, da im Anbau ohne Brennen die Konzentration konstant bleibt.

Vier Wochen nach dem Brennen erreicht die K-Konzentration mit 0,163 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ein Maximum. DENICH & KATO (1993) geben die Kalium-Konzentration in der Asche in Cumarú mit 20,6 % an, wobei jedoch nur der in heißer Salzsäure (1N) lösliche Asche-Anteil zur Analyse kam. HÖLSCHER (1995) gibt für die K-Konzentration in der Gesamt-Asche (7-j. Brache) der Chronosequenz *Marcelino*) einen Median von 23,2 mg g^{-1} (4,2-38,2 mg g^{-1}) an, also eine um eine Zehnerpotenz geringere Konzentration. Bei einer Aschemenge von 811 kg ha^{-1} in Cumarú entspräche dieses einem Eintrag von 18,8 kg K pro Hektar . Dieser Ascheeintrag würde rein rechnerisch einen Anstieg der Kaliumkonzentration in 0-10 cm Bodentiefe um 0,037 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ (bei einer Bodendichte von 1,3 g cm^{-3} ; Daten nicht dargestellt) bedeuten, jedoch nicht den Anstieg um ca. 0,09 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ 4 Wochen nach dem Brennen erklären. Das könnte einerseits ein Hinweis darauf sein, daß in Cumarú die K-Konzentration in der Asche höher war als bei HÖLSCHER (1995) oder Kalium auch aus anderen Quellen zu einer Konzentrationserhöhung beigetragen hat. Für diese These spricht, daß es nach dem Einsetzen der

ersten Regenfälle auch im Anbau ohne Brennen zu einem Anstieg der Kaliumkonzentration um ca. $0,03 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ gekommen ist (vgl. IV 4.1.1).

Kalium könnte aus nicht- oder nur teilweise verbranntem Pflanzenmaterial ausgewaschen und anschließend im Boden infiltriert worden sein (BRINKMANN & NASCIMENTO 1973), wofür die Niederschläge, die in diesem Zeitraum fielen, im Grunde genommen jedoch wohl zu gering waren (vgl. Abb. 3).

Daß auch die mikrobielle Biomasse eine Quelle für basische Kationen sein kann, belegen Untersuchungen von DIAZ-RAVIÑA et al. (1993) in Spanien. Diese stellten fest, daß es sowohl direkt nach der Fumigation von Bodenproben als auch nach einer anschließenden Inkubation zu einem Anstieg der Kaliumkonzentration um bis zu 69 %. Da jedoch die Gehalte an mikrobieller Biomasse in Cumarú vergleichsweise gering sind, hätte eine K-Freisetzung gemessen an der Kalium-Konzentration des Bodens nur einen sehr geringen Effekt gehabt. Außerdem kam es im Anbau ohne Brennen wohl nicht zu einem Abbau der mikrobiellen Biomasse (vgl. IV 4.1.3).

Am wahrscheinlichsten ist, daß die Wiederbefeuchtung des Bodens einen Mineralisierungsschub abgestorbenen Pflanzenmaterials, insbesondere der Wurzeln bewirkte, welches auch im Anbau ohne Brennen durch das Kahlschlagen der Brachevegetation vorhanden war. So ist auch ein leichter Anstieg der K-Konzentration in der Brache (Behandlung 1) von $0,059$ auf $0,071 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ erklärbar.

Generell setzt eine Bilanzierung die Erfassung derselben Kalium-Pools in der Asche (bzw. im Dünger) und im Boden voraus. Die Kaliumanalyse der Asche erfolgte nach Druckaufschluß mit HNO_3 am AAS (Atomabsorptionsspektrometer), die des Bodens mittels Mehlich 1-Extraktion (s. III 4.1.3). Durch die Mehlich 1-Extraktion wurde nach dem Methodenvergleich (III 4.1.3.1) mehr Kalium extrahiert als durch NH_4Cl (IBW), wodurch ein größerer Anteil des Ascheeintrages erklärbar wird. Zusammenfassend muß jedoch festgestellt werden, daß der Anstieg der Kalium-Konzentration im Boden nicht mit Hilfe des K-Eintrags über die Asche erklärt werden kann. Der um den Faktor 10 höhere von DENICH & KATO (1993) ermittelte Kaliumgehalt in der Asche ist ein Hinweis darauf, daß mehr Kalium durch den Eintrag in den Boden aus der Asche mobilisiert wurde als die nach HNO_3 -Aufschluß angegebene Konzentration ausweist. Außerdem dürfte die von HÖLSCHER (1995) ermittelte Kaliumkonzentration in der Asche für eine derartige Bilanzierung zu gering sein, da neben den eigentlichen Aschepartikeln auch Holzkohle mitanalysiert wurde.

Drei Wochen nach der Maissaat hat die Kalium-Konzentration bereits auf $0,127 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ abgenommen, trotz der kurz zuvor erfolgten Düngergabe. Der Kaliumeintrag über die Düngung liegt mit $16,6 \text{ kg K ha}^{-1}$ auf einem ähnlich hohen Niveau wie der Eintrag über die Asche. Die theoretische Konzentrationserhöhung in 0-10 cm Bodentiefe beträgt $0,033 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$. Ein Düngeeffekt ist drei Wochen nach der Maissaat jedoch nicht mehr feststellbar. Da die

Düngergabe 3 Wochen vor der Probenahme erfolgt war, ist u.U. ein Peak der K-Konzentration im Zeitraum zwischen der Düngung und der Probenahme nicht erfaßt worden.

Der Grund für die rasche Konzentrationsabnahme in 0-10 cm Bodentiefe dürfte in der hohen Mobilität des Kaliums liegen. Bis zur Probenahme kurz nach der Maissaat waren 350 mm Niederschlag gefallen, was zur Auswaschung geführt haben dürfte. Das zeigt auch die K-Konzentration in 10-20 cm Bodentiefe, die erst nach den genannten Regenfällen von 0,044 auf 0,091 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ansteigt (Anhang 7a).

Bereits zum Zeitpunkt der Maisernte ist die K-Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe wieder auf das Niveau der Ausgangskonzentration zurückgefallen (Tabelle 27). Primäre Ursache dürfte die Kaliumaufnahme der Mais- und Maniokpflanzen sowie eine sich fortsetzende Auswaschung sein. In 10-20 cm ist der Rückgang der K-Konzentration auf das Ausgangsniveau zeitlich verzögert.

Zwischen der Mais- und der Maniokernte bleibt die K-Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe unverändert. Das deutet einerseits darauf hin, daß der Maniok in dieser Phase entweder kein Kalium oder nur unwesentliche Mengen aufnimmt und andererseits, daß die K-Konzentration im Boden auf einem so geringen Niveau ist, daß es zu keiner Auswaschung mehr kommt.

In Iracema ist die Kaliumkonzentration geringer als in Cumarú. Sie nimmt in beiden Bodentiefen zum Ende der Anbauphase hin ab: in 0-10 cm Bodentiefe von 0,061 auf 0,046 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ (Tabelle 28), in 10-20 cm Bodentiefe von 0,046 auf 0,029 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ (Anhang 7b).

Calcium

Die Calciumkonzentration beträgt in Cumarú vor dem Brennen in 0-10 cm Bodentiefe 1,17 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, unmittelbar nach dem Brennen 1,36 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ und geht im Dezember (4 Wochen nach dem Brennen) auf 0,79 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ zurück (Tabelle 27). Ursache für diesen Rückgang dürften die ersten leichten Regenfällen (32 mm vom Brennen bis zur Probenahme) sein, die schnell verfügbares Calcium, vor allem aus der verbrannten Streu, aus dem Oberboden auswaschen. Dies deckt sich mit Ergebnissen von BRINKMANN & NASCIMENTO (1973). Auch in 10-20 cm Bodentiefe nimmt die Konzentration (Ca+Mg) signifikant ab (Anhang 7a).

Ein deutlicher Anstieg der Ca-Konzentration auf 2,41 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ ist in 0-10 cm Bodentiefe 11 Wochen nach dem Brennen (3 Wochen nach der Maissaat) zu beobachten. Dieser beruht in erster Linie auf einer Infiltrierung des Calciums aus der Asche sowie aus nicht verbrannten Pflanzenteilen in den Boden und auf der Düngergabe. HÖLSCHER (1995) gibt für die Ca-Konzentration in der Asche einen Median von 108 mg g^{-1} (gerundet; 25-182 mg g^{-1}) an, was einem Eintrag von 87,6 kg ha^{-1} bzw. einer Konzentrationserhöhung in 0-10 cm Bodentiefe

von $0,084 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ entspricht. Selbst ein maximaler Ascheeintrag bei gleichzeitiger maximaler Calciumkonzentration in der Asche würde eine Erhöhung der Bodenkonzentration von lediglich $0,20 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ bewirken. Auch die Düngergabe ist mit $4,2 \text{ kg Calcium pro Hektar}$ gering (P-Gabe: 28 kg ha^{-1} , Ca-Konzentration im Superphosphat ca. 15 %).

Bis zum Ende der Anbauphase nimmt die Ca-Konzentration stetig bis auf rund $1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ab und unterscheidet sich somit nicht vom Ausgangsniveau.

In 10-20 cm Bodentiefe wurden die Gehalte an Magnesium und Calcium aufgrund der geringen Konzentrationen ($< 1,0 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) gemeinsam analysiert. Ihr Gehalt liegt zwischen $0,29$ und $0,61 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ und wird von der Ca-Konzentration dominiert (Anhang 7a).

In Iracema sinkt der gemeinsam analysierte Gehalt an Calcium und Magnesium in 0-10 cm Bodentiefe von $1,94 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ zum Zeitpunkt der Maisernte auf $0,83 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ bei der Maniokernte (Tabelle 28), in 10-20 cm Bodentiefe von $0,41$ auf $0,20 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Anhang 7b).

Magnesium

Die gemessene Magnesiumkonzentration liegt in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe zwischen $0,25$ und $0,81 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Tabelle 27; in 10-20 cm s.u. Calcium). Von der Tendenz her steigt sie nach dem Brennen an, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. HÖLSCHER (1995) gibt die Magnesiumkonzentration in der Asche mit $15,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (= Median; 3,9-26,2) an, was einem Mg-Eintrag von nur $12,5 \text{ kg ha}^{-1}$ entspräche und den geringen Effekt auf die Konzentration im Boden erklärt. Sowohl für Magnesium als auch Calcium gilt, daß die angegebenen Konzentrationen in der Asche zu niedrig sind, da Holzkohle mitanalysiert wurde (vgl. Kalium).

Summe der austauschbaren Kationen (aK), Kationenaustauschkapazität (KAK), H^+ , Al^{3+}

Die Summe der austauschbaren basischen Kationen liegt in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe im Bereich von $1,4$ und $3,0 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, die der Kationenaustauschkapazität zwischen $3,4$ und $5,1 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Tabelle 27), in 10-20 cm zwischen $0,37$ und $0,71$ bzw. $3,1$ und $3,7 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ (Anhang 7a). Der Effekt des Brennens auf die Konzentrationen ist nicht signifikant. Beide Parameter erreichen drei Wochen nach der Maissaat ein Maximum von $3,03$ bzw. $5,10 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, was fast ausschließlich auf die zu diesem Zeitpunkt vorhandene hohe Calciumkonzentration zurückzuführen ist.

In Iracema nimmt die Summe der austauschbaren basischen Kationen in 0-10 cm Bodentiefe vom Zeitpunkt der Maisernte bis zur Maniokernte von 2,04 auf 0,88 cmol(+) kg⁻¹ ab (Tabelle 28), in 10-20 cm Bodentiefe von 0,49 auf 0,29 cmol(+) kg⁻¹ (Anhang 7a).

Austauschbares Aluminium konnte in Cumarú während der gesamten Anbauphase nicht nachgewiesen werden, in Iracema lediglich zum Zeitpunkt der Maisernte mit 0,03 cmol(+) kg⁻¹.

Die H⁺-Ionenkonzentration war in 0-10 cm Bodentiefe vor dem Brennen in Cumarú mit 2,9 cmol(+) kg⁻¹ am höchsten und ging während der Maiskultur auf 1,6 cmol(+) kg⁻¹ zurück. Zum Zeitpunkt der Maniokernte war sie mit 2,2 cmol(+) kg⁻¹ signifikant niedriger als vor dem Brennen (Tabelle 27). Gleiches gilt für die Bodentiefe 10-20 cm mit 2,07 cmol(+) kg⁻¹ bei der Maniokernte gegenüber 2,86 cmol(+) kg⁻¹ vor dem Brennen (Anhang 7a).

An beiden Standorten kommt es zum Zeitpunkt der *Vigna*-Ernte (letztes Hacken), insbesondere in 10-20 cm Bodentiefe zu einem Anstieg der H⁺-Ionenkonzentration.

MARTINS et al. (1990b) berichten, daß eine gebrannte Fläche gegenüber dem Primärwald eine um 1 cmol(+) kg⁻¹ geringere "Gesamtazidität" (Al + H) aufwies (Bodentiefe: 0-10 cm, Capitão Poço, Ost-Amazonien).

In zahlreichen Publikationen wird von einem durch das Brennen bedingten Anstieg der Nährstoffkonzentration im Boden berichtet (z.B. UHL & JORDAN (1984) in Zentral-Amazonien; STROMGAARD (1984, zit. in CHIDUMAYO 1987) in Sambia; MARTINS et al. (1990b) in Ost-Amazonien).

BRINKMANN & NASCIMENTO (1973; nähere Informationen s. 3.1 pH-Wert) berichten, daß die gemeinsam gemessenen Konzentrationen von Calcium und Magnesium wenige Tage nach dem Brennen eines Primärwaldes um das 2 - 5fache anstieg, die des Kaliums um das 2 - 4fache. Austauschbares Aluminium fiel dagegen auf ca. 40 % der Ausgangskonzentration zurück.

STROMGAARD (1984, zit. in CHIDUMAYO 1987) berichtet, daß nach dem Brennen die Kaliumkonzentration im Mineralboden trotz des Ausbleibens von Regen innerhalb eines Tages anstieg. Bei dem untersuchten Anbausystem ("chitemene" shifting cultivation System in Sambia) wird das Pflanzenmaterial jedoch zu Haufen aufgetürmt und verbrannt, was zu einer räumlichen Konzentrierung der Asche führt.

3.2 Bodenbiologische Veränderungen im Verlauf der traditionellen Anbauphase

3.2.1 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten im Verlauf der traditionellen Anbauphase

Saure Phosphatase

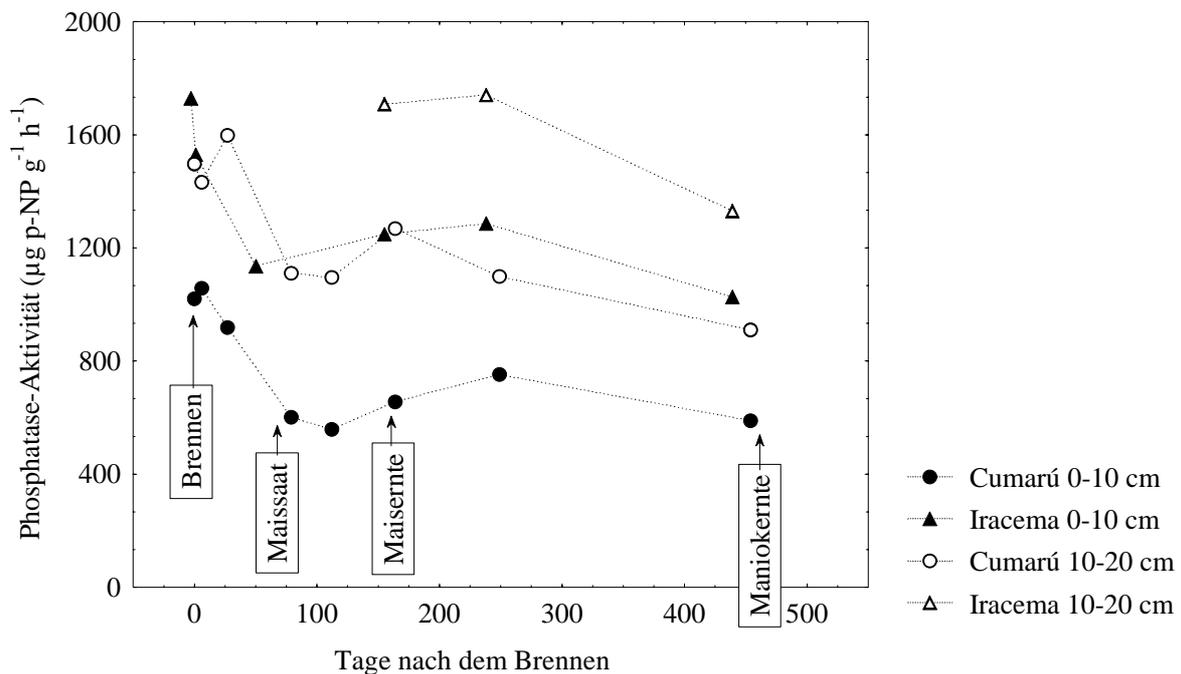


Abbildung 14 Veränderung der Aktivität der sauren Phosphatase in zwei Bodentiefen (0-10 und 10-20 cm) des traditionellen Mais-Maniok-Anbausystems, Cumarú und Iracema

In Abbildung 14 ist der Verlauf der Phosphatase-Aktivität in den Bodenschichten 0-10 und 10-20 cm während der Anbauphase im traditionellen Anbausystem in Tagen nach dem Brennen dargestellt. Das Niveau der Phosphatase-Aktivität liegt in Cumarú in 0-10 cm zwischen 558 und 1058, in 10-20 cm Bodentiefe zwischen 911 und 1598 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. In Iracema ist die Aktivität mit 1026-1730 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ in 0-10 cm und 1331-1741 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ in 10-20 cm deutlich höher.

Standortvergleich

Auffallend ist das hohe Niveau der Aktivität am Standort Iracema gegenüber Cumarú. Es liegt im Mittel aller an beiden Standorten durchgeführten Probenahmen um 70 % höher als in Cumarú. Das Ergebnis einer multiplen Regression mit Daten, die zum Zeitpunkt der Maisernte an beiden Standorten in 0-10 cm Bodentiefe erhoben wurden (Tabelle 29), macht deutlich, daß die hohe Phosphatase-Aktivität in Iracema mit dem relativ niedrigen pH, dem höheren C_{org} -Gehalt und der geringen P_i -Konzentration in Zusammenhang steht. Die Erhöhung des C_{org} -Gehaltes gegenüber dem Standort Cumarú ist mit 10,5 gegenüber 9,5 g kg^{-1} so gering, daß sie nur scheinbar in Widerspruch zu den Aussagen von RASTIN et al. (1988; vgl. IV 2.1.1) steht. Dort traten wesentlich höhere C-Gehalte auf, und das in Verbindung mit hohen Tongehalten. Die P_i -Konzentration spielt eine vergleichsweise geringe Bedeutung, da sie wie die Phosphatase-Aktivität eng mit dem pH des Bodens korreliert ist (siehe Abbildung 15).

Tabelle 29 Multiple Regression für die Aktivität der sauren Phosphatase in 0-10 cm Bodentiefe in Cumarú und Iracema zum Zeitpunkt der Maisernte

	part. Korrelations- koeffizient (β)	Standard- fehler β	B	Standard- fehler B	t(52)	Signifikanz- niveau -
Interzept			4434	504	8,790	0,000
pH(CaCl_2)	-0,674	0,084	-796	99	-8,047	0,000
C_{org} (g kg^{-1})	0,234	0,062	577	152	3,786	0,000
P_i (NC) (mg kg^{-1})	-0,193	0,081	-30	13	-2,376	0,021

$R = 0,9035$ $R^2 = 0,8163$ korrigiertes $R^2 = 0,8057$

$F(3,52) = 77,045$ ($p < 0,000$) Standardfehler: 181,58

Die durch den Anbau bedingten Veränderungen der Phosphatase-Aktivität werden durch die Darstellung von absoluten Zahlen wie in Abbildung 14 nur unzureichend deutlich. In Abbildung 16 ist die enzymatische Aktivität im Boden als prozentuale Veränderung gegenüber einer Referenz dargestellt. Diese Referenz ist im vorliegenden Fall die Ausgangsvegetation, die für den Anbau abgeschlagen wurde (= Behandlung 1 im Versuch Cumarú /Iracema). Sie entspricht in Abbildung 16 folglich der Abszisse. Diese Art der Darstellung erscheint legitim, da die wissenschaftliche Maßeinheit, mit der enzymatische Aktivitäten ausgedrückt werden (Abbau eines Substrates in einer bestimmten Zeit bei einer definierten Temperatur), relativ abstrakt ist. Die absoluten Meßwerte sind tabellarisch dargestellt (Bodentiefe 0-10 cm in Tabelle 27 (Cumarú) und Tabelle 28 (Iracema), Bodentiefe 10-20 cm in Anhang 7a bzw. 7b).

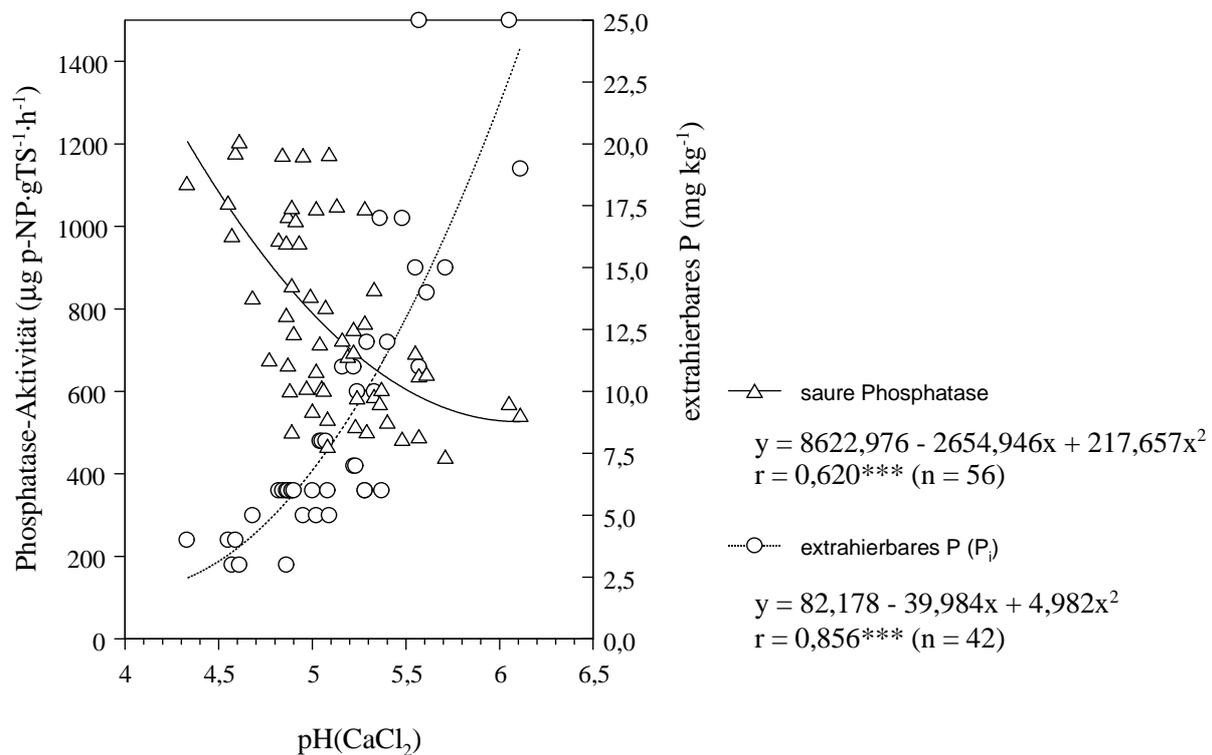


Abbildung 15 Einfluß des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ auf die Phosphatase-Aktivität und die Konzentration an anorganischem Phosphor im Boden, Bodentiefe 0-10 cm, Cumarú

Abbildung 16 macht deutlich, daß nach dem Abschlagen der Brachevegetation (noch vor dem Brennen) die Phosphatase-Aktivität in beiden Bodentiefen des Anbausystems gegenüber der Brachefläche um 4-12 % erhöht ist. Nach dem Brennen und dem Einsetzen erster Regenfälle (in Cumarú waren bis zur Probenahme 32 mm Niederschlag gefallen) kommt es in 0-10 m Bodentiefe zu einem Rückgang der Aktivität auf -20 %, nach der Maissaat bis auf -40 %. Im weiteren Verlauf der Anbauphase verändert sich die Phosphatase-Aktivität im Vergleich zu der Brache nicht mehr und bleibt stetig ca. 35 % unter deren Niveau.

Die Veränderungen der Phosphatase-Aktivität in 10-20 cm Bodentiefe sind an beiden Standorten deutlich geringer als in 0-10 cm Bodentiefe. Die Aktivität am Standort Cumarú zeigt dabei eine ähnliche Tendenz wie in 0-10 cm Bodentiefe, ist jedoch weniger stark ausgeprägt. Sie liegt vor dem Brennen mit +12 % über dem Niveau der Brache und sinkt bis 11 Wochen nach der Maissaat auf -7 % ab.

Warum das Aktivitätsniveau vor dem Brennen relativ hoch war, kann nur gemutmaßt werden. Es ist vorstellbar, daß durch das Kahlschlagen der Brachevegetation absterbende Pflanzenwurzeln eine stimulierende Wirkung auf die Phosphatase-Aktivität hatten. Das unterschiedliche

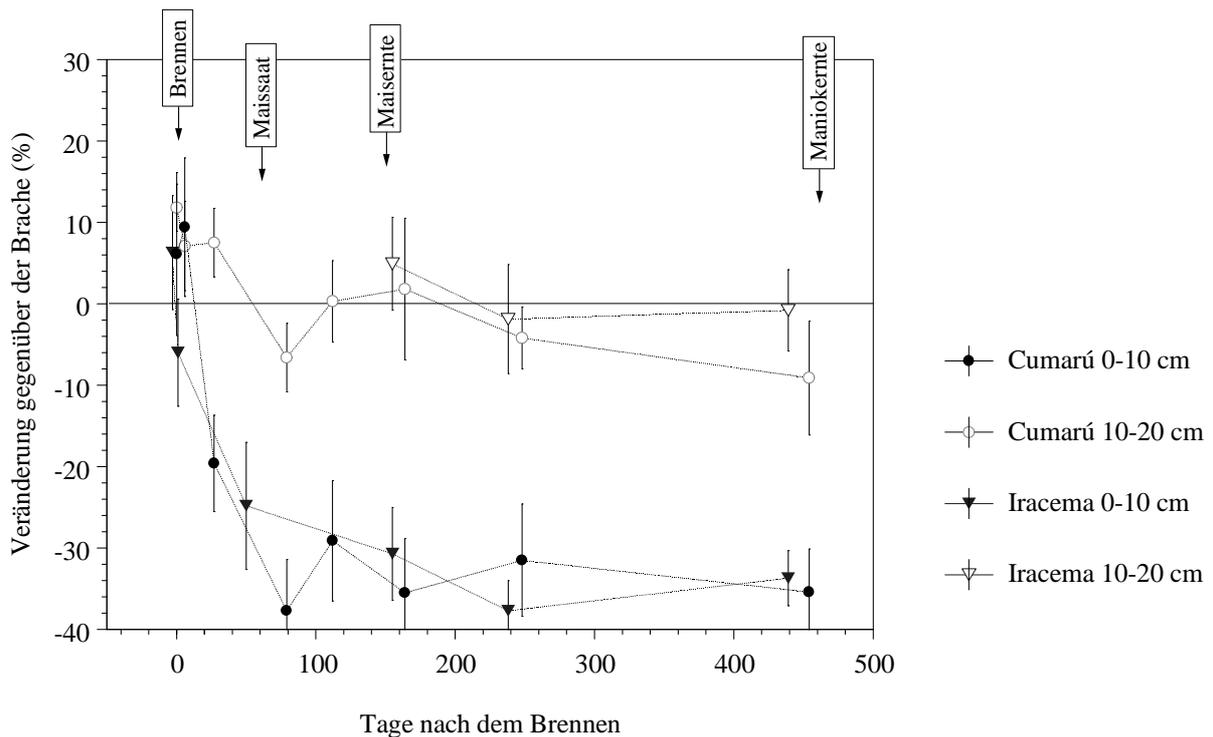


Abbildung 16 Relative Veränderung der Aktivität der sauren Phosphatase in zwei Bodentiefen (0-10 und 10-20 cm) des traditionellen Mais-Maniok-Anbausystems gegenüber der Ausgangsvegetation, Cumarú und Iracema 1992-94 (Standardfehler; n=7)

Aktivitätsniveau in beiden Bodentiefen ist dabei wohl auf die Heterogenität des Standortes zurückzuführen, da in Behandlung 4 (Anbau ohne Brennen) das Verhältnis gegensätzlich ist, obwohl bis zu diesem Zeitpunkt beide Anbausysteme gleich behandelt worden waren. Zum Zeitpunkt der Maniokernte liegt die Phosphatase-Aktivität in 10-20 cm Bodentiefe 10 % unter der der Brache. In Iracema zeigt sie in 10-20 cm Bodentiefe keine eindeutige Tendenz und oszilliert um Null.

Ursachen für die Abnahme der Aktivität

In Tabelle 30 ist das Ergebnis einer multiplen Regression darstellt, bei der Daten vom Zeitpunkt des Brennens sowie 79 Tage nach dem Brennen in 0-10 cm Bodentiefe verrechnet wurden. Es wird deutlich, daß ausschließlich der Anstieg des pH-Wertes für den Rückgang der Phosphatase-Aktivität entscheidend ist (siehe auch IV 2.2.1). Der Einfluß der organischen Substanz kann statistisch nicht abgesichert werden. Außerdem müßte die leichte Zunahme des Kohlenstoffgehaltes (vgl. Tabelle 27) eine Zunahme der Phosphatase-Aktivität zur Folge haben, da beide positiv miteinander korreliert sind ($\beta = 0,363$). Es ist zu vermuten, daß bei der C-Analyse Aschepartikel mit erfaßt wurden. Folglich spiegelt der zu diesem Zeitpunkt

bestimmte C-Gehalt wohl nicht die Konzentration an organischer Substanz wider, was die schwache Beziehung zur Phosphatase-Aktivität erklären würde.

Der Gehalt an anorganischem Phosphor hat nur eine untergeordnete Bedeutung für die Aktivität der sauren Phosphatase, weil er seinerseits pH-abhängig ist, was in Abbildung 15 deutlich wird. In diese Darstellungen wurden die Daten aller Probenahmen in 0-10 cm Bodentiefe während der Anbauphase in Cumarú einbezogen.

Tabelle 30 Multiple Regression für die Aktivität der sauren Phosphatase in 0-10 cm Bodentiefe zum Zeitpunkt des Brennens sowie 79 Tage nach dem Brennen in Cumarú

	part. Korrelations- koeffizient (β)	Standard- fehler β	B	Standard- fehler B	t(52)	Signifikanz- niveau
Interzept			2309	611	3,779	0,004
pH(CaCl ₂)	-0,932	0,302	-393	127	-3,089	0,011
C _{org}	0,363	0,187	642	331	1,939	0,081
P _i (NC)	-0,225	0,328	-7	10	-0,687	0,508

R= 0,9035 R²= 0,8453 korrigiertes R²= 0,8057

F(3,52)= 18,121 (p < 0,00023) Standardfehler: 114,05

FELLER et al. (1994) weisen eine enge Beziehung der Phosphatase-Aktivität zur organischen Substanz nach, indem sie völlig unterschiedliche agrarökologische Systeme Westafrikas, Mittel- und Südamerikas in die Berechnung der Korrelation aufnehmen. Daten aus dem Senegal, der Elfenbeinküste und Togo zeigen darüber hinaus, daß Flächen mit Primärvegetation und Brachen höhere Phosphatase-Aktivitäten aufweisen als Anbauflächen. Es wird jedoch auch deutlich, daß das Niveau der Phosphatase-Aktivität in hohem Maße standortabhängig ist, so daß bei einem Vergleich relative Veränderungen gegenüber einer Referenzfläche (z.B. Primärwald) herangezogen werden sollten.

Effekt des Brennens auf die Phosphatase-Aktivität

ADAMS et al. (1994) stellten fest, daß mit der Häufigkeit des Brennens von Anbauflächen die Aktivität der sauren Phosphatase abnahm. SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) wiesen in Laborversuchen nach, daß die Phosphatase-Aktivität in Böden, die einer Hitzebehandlung unterzogen wurden, mit der Höhe der Temperatur abnahm. Bei einer 30-minütigen Einwirkung einer Temperatur von 250 °C war die Aktivität praktisch gleich Null. Dieses stimmt mit Angaben von SKUJINS (1967, zit. in SAA et al. 1993) überein, nach dessen

Untersuchungen die Phosphatase-Aktivität bei 180 °C vollständig inaktiviert wird. SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) führen diesen Rückgang auf eine Denaturierung der enzymatischen Proteine durch die hohen Temperaturen zurück, also auf einen direkten Temperatureffekt (die Analyse der Phosphatase-Aktivität erfolgte unmittelbar nach der Temperaturbehandlung).

Da es in Cumarú (nur dort wurden unmittelbar nach dem Brennen Bodenproben gezogen) nach dem Brennen zu keiner Abnahme der Phosphatase-Aktivität kam (vgl. Tabelle 27), muß davon ausgegangen werden, daß kein unmittelbarer, direkter Effekt der Temperatureinwirkung, sprich eine Denaturierung der Phosphatasen vorliegt. Ursache könnte sein, daß die Einwirkungsdauer der hohen Temperaturen im Vergleich zu den Untersuchungen von SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) kürzer gewesen ist; das Abbrennen des trockenen Pflanzenmaterials dauerte, auf eine begrenzte Fläche bezogen, maximal 10 Minuten. Außerdem ist davon auszugehen, daß die Einwirkung des Brennens auf den Boden nur sehr oberflächlich war oder zumindest die Höhe der Temperatur sehr rasch mit der Bodentiefe abgenommen hat (siehe z.B. ANDRIESSE & SCHELHAAS 1987). Wenn es einen direkten Brenneffekt gegeben hat, so konnte er aufgrund des mit 0-10 cm gewählten, relativ groben Beprobungsschemas, nicht nachgewiesen werden. Eine geringere Abstufung der Probenahmetiefen, z.B. in 2 cm-Abständen, wäre für die Beantwortung dieser Fragestellung angebrachter gewesen. Unterstützt wird diese These durch Daten von SAA et al. (1993), die in 0-5 cm Bodentiefe mit 79-94 % wesentlich gravierendere Aktivitätsverluste nach dem Brennen fanden.

Es liegt also in der Bodentiefe 0-10 cm ausschließlich ein indirekter Effekt des Brennens auf die Phosphatase-Aktivität vor. Ob der Rückgang der Phosphatase-Aktivität neben der Abhängigkeit vom pH-Wert (vgl. IV 3.2.1) auch auf einen Rückgang des P_{mik} -Gehaltes beruht, kann nur gemutmaßt werden, da zu diesem Zeitpunkt keine entsprechenden Analysen durchgeführt wurden. Die P_{mik} -Gehalte, 8 Monate nach dem Brennen (Beginn der Sukzession der Brachevegetation) analysiert, sind jedoch im Boden des Anbausystems um 16 % (14,5 gegenüber 17,2 mg kg⁻¹) geringer als im Boden der Brache (siehe IV 3.3.3). Daß dieser Rückgang ausschließlich auf einem direkten Effekt des Brennens beruht, ist zweifelhaft. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß die veränderten Bedingungen (höherer pH-Wert (pH(CaCl₂)) 5,65 gegenüber 4,60, vgl. IV 3.2.1, Tabelle 27, sowie erhöhte Bodentemperaturen (Daten hier nicht präsentiert) zu einer verstärkten Mineralisierung des in der mikrobiellen Biomasse gebundenen Phosphors geführt haben.

Auch SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) stellten fest, daß die Phosphatase-Aktivität nach der Hitzebehandlung nur sehr langsam ihr ursprüngliches Niveau erreicht bzw. nach 6 Monaten deutlich darunter bleibt. Als Erklärung geben sie an, daß (a) durch die Hitzeeinwirkung ein Teil der Mikroorganismenpopulationen abgetötet wird und daß (b) der Anstieg der P_i -

Konzentration zu einer Hemmung der Enzymsynthese führt (siehe auch PANG & KOLENKO 1986). Der von den SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) gemessene Konzentrationsanstieg an anorganischem, labilem Phosphor müßte folglich auf einer Freisetzung aus der mikrobiellen Biomasse beruhen.

Es sollte nicht außer acht gelassen werden, daß die von SERRASOLSAS & KHANNA (1995b) durchgeführten Untersuchungen im Labor erfolgten. Es fehlte folglich im Gegensatz zum Freiland ein aktiver Unterboden.

Urease

Die Aktivität der Urease liegt in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe zwischen $15,3$ und $30,3 \mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$, in 10-20 cm zwischen $10,8$ und $20,7 \mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ (Abbildung 17). In Iracema wurde die Urease-Aktivität lediglich im Zeitraum zwischen der Mais- und der Maniokernte gemessen. Sie betrug in 0-10 cm Bodentiefe zwischen $22,4$ und $29,6 \mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$, in 10-20 cm zwischen $15,5$ und $22,1 \mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$. Das Niveau beider Standorte unterscheidet sich also nur unwesentlich.

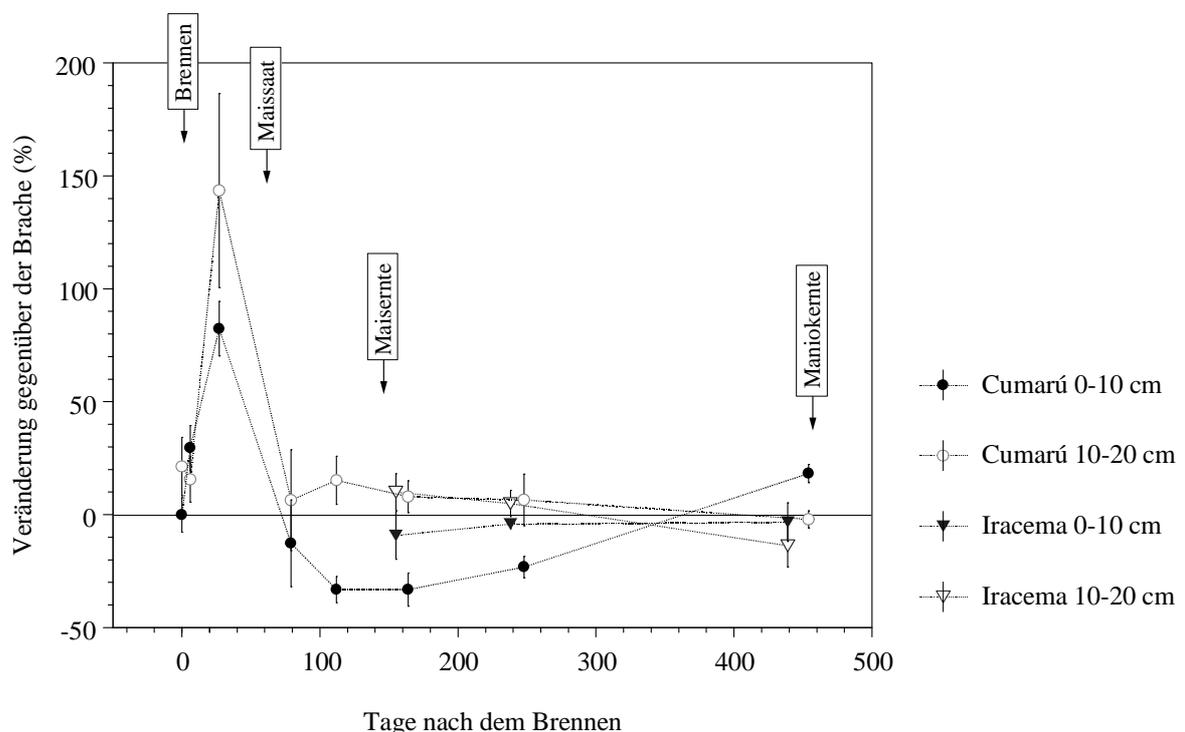


Abbildung 17 Relative Veränderung der Urease-Aktivität gegenüber der Ausgangsvegetation im Boden (0-10 und 10-20 cm) des traditionellen Mais-Maniok-Anbausystems, Cumarú und Iracema (Standardfehler; n=7)

Während der Maiskultur kommt es in Cumarú zu einem deutlichen Rückgang der Aktivität von 28,1 auf 15,3 $\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$. Die Ursachen hierfür konnten durch die Berechnung einer multiplen Regression nicht erklärt werden. Nach der Maisernte steigt die Urease-Aktivität an beiden Standorten an.

β -Glucosidase

Das Niveau der β -Glucosidase-Aktivität liegt während der traditionellen Anbauphase in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe zwischen 10,1 und 32,2 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in 10-20 cm zwischen 7,2 und 14,3 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Abbildung 18). In Iracema beträgt die Aktivität der β -Glucosidase in 0-10 cm Bodentiefe zwischen 12,3 und 23,4 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$, in 10-20 cm in der Phase zwischen Mais- und Maniokernte um 10 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Das Niveau beider Standorte unterscheidet sich also nur unwesentlich.

Auffällig am zeitlichen Verlauf der Aktivität ist ihr Ansteigen zu den jeweiligen Ernteterminen von Mais und Maniok. Als mögliche Ursache kommt eine erhöhte Verfügbarkeit leicht abbaubarer organischer Substanz in Frage, verursacht durch die bereits lange vor der Ernte eintretende Seneszenz der Kulturpflanzen. Diese ist mit einem verstärktem Blattfall sowie dem Absterben von Wurzeln verbunden (vgl. IV 5.1.1).

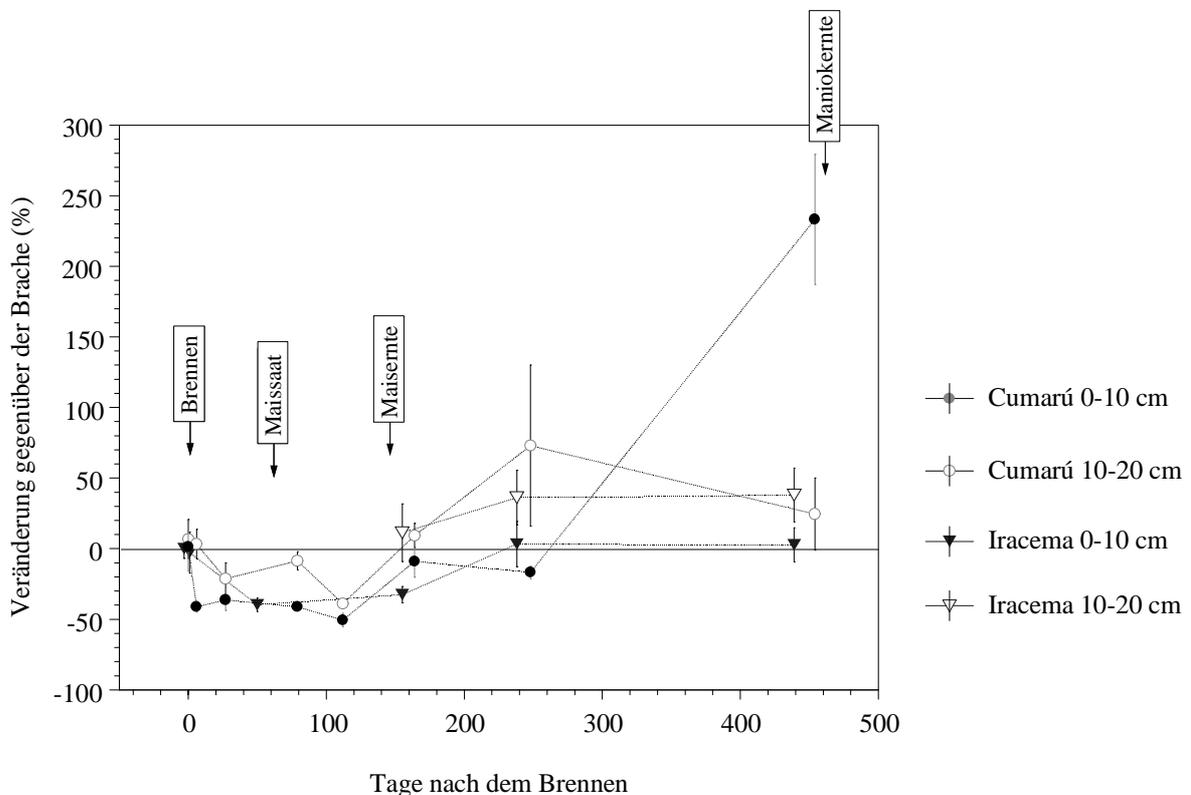


Abbildung 18 Relative Veränderung der Aktivität der β -Glucosidase gegenüber der Ausgangsvegetation im Boden (0-10 und 10-20 cm) des traditionellen Mais-Maniok-Anbausystems, Cumarú und Iracema (Standardfehler; n=7)

3.3 Bilanzierung des Effektes der traditionellen Anbauphase

In den Feldversuchen Cumarú und Iracema wurden am 30.7. bzw. 2.8.1993 Bodenproben gezogen (248 bzw. 238 Tage nach dem Brennen). Der Mais war zwei Monate zuvor geerntet worden, nur der Maniok war auf dem Feld verblieben. Man kann diesen Zeitpunkt als eine Art Wendepunkt in dem traditionellen Anbausystem betrachten, den Übergang von der Anbau- zur Brachephase. Im allgemeinen wird in dieser Zeit zum letzten Mal gehackt, so daß sich die Sekundärvegetation von nun an relativ ungestört entwickeln kann.

Ausnahme ist in diesem Zusammenhang das Anbausystem mit Bohnen. Die Bohnenernte erfolgte erst wenige Tage nach der Bodenprobenahme, außerdem mußte auf diesen Flächen noch mehrere Male gehackt werden, da der Maniok bis dato kein geschlossenes Kronendach gebildet hatte. So ist der Übergang von der Anbau- zur Brachephase in diesem Anbausystem erst 3-4 Monate später anzusetzen, was bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden muß.

3.3.1 Effekt des traditionellen Anbaus auf die bodenchemischen Parameter

Beide pH-Werte sind im traditionellen Anbau an beiden Standorten in 0-10 cm Bodentiefe signifikant gegenüber der Brache erhöht. Der pH(CaCl₂)-Wert beträgt in Cumarú im Anbau pH 4,94, in der Brache pH 4,56, der pH(H₂O) 6,03 bzw. 5,79 (Tabelle 31). Entsprechend ist die H⁺-Ionenkonzentration mit 2,2 cmol(+) kg⁻¹ in der Anbaufläche deutlich geringer als in der Brachefläche mit 2,7 cmol(+) kg⁻¹. In Iracema beträgt der pH(CaCl₂) im Anbau pH 4,62, in der Brache 4,28, der pH(H₂O) 5,77 bzw. 5,51. In 10-20 cm Bodentiefe sind die Unterschiede an beiden Standorten nicht signifikant (Tabelle 31).

Sowohl die Konzentration von Kalium als auch von Calcium ist im Boden der Anbaufläche teils signifikant, teils nicht signifikant gegenüber der Brache erhöht (Tabelle 31). Das wirkt sich auf die Summe der austauschbaren basischen Kationen aus, die in der Anbaufläche als Folge des Brennens und der Düngung 2,35 cmol(+) kg⁻¹ beträgt, in der Brachefläche dagegen nur 1,9 cmol(+) kg⁻¹. Die Basensättigung ist in Cumarú mit 52 % in der Anbaufläche gegenüber 42 % in der Brache in 0-10 cm Bodentiefe signifikant höher.

Sowohl der C_{org}- als auch der N_t-Gehalt bleiben statistisch gesehen unverändert (Tabelle 31). Dabei ist der C_{org}-Gehalt von der Tendenz her in der Anbaufläche um 7 (Cumarú) bzw. 9 % (Iracema) geringer als in der Brachefläche (Bodentiefe 0-10 cm). Die NH₄-Konzentration ist in der Anbaufläche mit 12,7 gegenüber 16,6 mg kg⁻¹ signifikant geringer, die NO₃-Konzentration mit 4,3 gegenüber 1,2 mg kg⁻¹ höher.

Die P_i(NC)-Konzentration ist in der Anbaufläche in Cumarú in 0-10 cm Bodentiefe gegenüber der Brache mit 5,9 gegenüber 2,7 mg kg⁻¹ deutlich erhöht (Tabelle 31). Dasselbe gilt für die

Tabelle 31 Chemische Bodenparameter im traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) im Vergleich mit einer 4-jährigen Brache (Ausgangsvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuche Cumarú (30.7.1993, 35 Wochen nach dem Brennen) und Iracema (2.8.1993, 34 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	Cumarú						Iracema					
	0-10 cm			10-20 cm			0-10 cm			10-20 cm		
	Brache	Anbau	T-Test	Brache	Anbau	T-Test	Brache	Anbau	T-Test	Brache	Anbau	T-Test
pH(H ₂ O)	5,79	6,03	**	5,19	5,26	ns	5,51	5,77	**	5,20	5,28	ns
pH(CaCl ₂)	4,56	4,94	***	4,02	4,08	ns	4,28	4,62	**	4,06	4,15	ns
C _{org} (g kg ⁻¹)	10,2	9,5	ns	6,4	6,2	ns	11,6	10,5	ns	6,9	7,1	ns
N _t (g kg ⁻¹)	0,91	0,89	ns	0,77	0,74	ns	1,09	1,01	ns	0,70	0,70	ns
C/N	11	11	ns	8	8	ns	11	10	ns	10	10	ns
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	16,6	12,7	*	13,6	13,0	ns	15,0	12,1	*	10,1	10,3	ns
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	1,2	4,3	**	2,3	3,1	ns	-	-		-	-	
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	2,7	5,9	***	2,0	2,0	ns	2,6	4,1	*	2,1	2,7	*
P _i (OL) (mg kg ⁻¹)	4,3	10,5	***	3,1	4,8	***	-	-		-	-	
P _t (g kg ⁻¹)	0,10	0,13	ns	0,11	0,13	ns	0,01	0,01	ns	0,01	0,01	ns
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,50	1,79	ns	-	-		1,21	1,43	ns	-	-	
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,83	2,26	ns	0,53	0,61	ns	1,59	1,79	ns	0,39	0,41	ns
Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,33	0,47	ns	-	-		0,37	0,36	ns	-	-	
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,051	0,069	ns	0,030	0,049	***	0,047	0,059	*	0,027	0,039	*
Na ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,03	0,03	ns	0,03	0,03	ns	0,03	0,03	ns	0,02	0,02	ns
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,0	0,0	ns	0,2	0,2	ns	0,03	0,00	ns	0,37	0,36	ns
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,7	2,2	*	2,9	2,8	ns	3,2	2,9	ns	2,9	3,1	ns
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	1,91	2,35	ns	0,59	0,69	ns	1,66	1,88	ns	0,43	0,47	ns
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	4,58	4,51	ns	3,69	3,65	ns	4,89	4,82	ns	3,75	3,91	ns
Basensättigung (%)	42	52	*	16	19	ns	34	39	ns	11	12	ns

$P_i(OL)$ -Konzentration, die sowohl in 0-10 cm Bodentiefe (10,5 gegenüber 4,3 mg kg⁻¹) als auch in 10-20 cm Bodentiefe (4,8 gegenüber 3,1 mg kg⁻¹) signifikant gegenüber der Brache erhöht ist. In Iracema zeigt sich dieselbe Tendenz, wenn auch weniger deutlich (Tabelle 31). Im Vergleich zu Cumarú ist das Niveau in 0-10 cm Bodentiefe der Anbaufläche geringer, in 10-20 cm Bodentiefe dagegen höher (vgl. IV 4.1.1, Tab. 35).

Die Gehalte an organischem Phosphor (Tabelle 19) unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, wie bereits in Kapitel IV 2.1 dargelegt wurde.

3.3.2 Effekt des traditionellen Anbaus auf die enzymatischen Aktivitäten

In Tabelle 32 und Tabelle 33 werden die enzymatischen Aktivitäten in der 4-jährigen Brache dem traditionellen Anbau in Cumarú und in Iracema 35 bzw. 34 Wochen nach dem Brennen gegenübergestellt. In Cumarú liegen in 0-10 cm Bodentiefe die Aktivitäten in der Anbaufläche mit -21 bis -36 % deutlich unter jenen der Brachefläche. In Iracema zeigen lediglich die Aktivitäten der sauren und der basischen Phosphatase mit -39 bzw. -53 % eine deutliche Depression. Die Aktivitäten der Urease und der β -Glucosidase unterscheiden sich nicht. In 10-20 cm liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Aktivitäten der Brache- und der Anbaufläche vor. Lediglich die basische Phosphatase sowie die β -Glucosidase zeigen in Cumarú mit +25 bzw. +21 % einen Anstieg ihrer Aktivitäten in der Anbaufläche; die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Tabelle 32 Enzymatische Aktivitäten im traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) im Vergleich mit einer 4-jährigen Brache (Ausgangsvvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Cumarú 30.7.1993 (35 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	0-10 cm			Differenz (%)	10-20 cm			Differenz (%)
	Brache	Anbau	T-Test		Brache	Anbau	T-Test	
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	1118	752	**	-33	1154	1099	ns	
basische Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	57	37	***	-36	27	34	ns	(+25)
Urease ($\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)	31,9	25,3	*	-21	18,4	18,7	ns	
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	24,0	18,7	ns	(-22)	9,7	11,7	ns	(+21)

Tabelle 33 Enzymatische Aktivitäten im traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) im Vergleich mit einer 4-jährigen Brache (Ausgangsvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Iracema 2.8.1993 (34 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	0-10 cm			Differenz (%)	10-20 cm		
	Brache	Anbau	T-Test		Brache	Anbau	T-Test
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	2091	1286	***	-39	1789	1741	ns
basische Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	96	45	***	-53	51	56	ns
Urease ($\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)	24,5	23,5	ns		15,4	16,1	ns
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	23,3	23,4	ns		7,5	9,7	ns

3.3.3 Effekt des traditionellen Anbaus auf die mikrobielle Biomasse und die mikrobielle Respiration

Mikrobieller Biomasse-Kohlenstoff (C_{mik})

Der C_{mik} -Gehalt in 0-10 cm Bodentiefe ist mit 123 mg kg^{-1} gegenüber 134 mg kg^{-1} leicht zurückgegangen, die Veränderung ist jedoch nicht signifikant (Tabelle 34). Aufgrund der Tatsache, daß sich der C_{org} -Gehalt nur geringfügig verändert (Tabelle 31), verändert sich auch der $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient nicht. Dieser liegt in 0-10 cm Bodentiefe bei 1,3 % und ist damit deutlich höher als in 0-5 cm Bodentiefe der Maniokfläche in der Chronosequenz *Cumarú* (IV 2.2.2, Tab. 25). Verglichen mit Literaturdaten ist er dennoch als außerordentlich gering einzustufen.

LUIZÃO et al. (1991) stellten im Rahmen von Untersuchungen nördlich von Manaus (Zentral-Amazonien) fest, daß die mikrobielle Biomasse durch das Abschlagen und Brennen des Primärwaldes in 0-5 cm Bodentiefe um 64 % abnahm (von 1287 auf $829 \mu\text{g g}^{-1}$), in 5-20 cm Bodentiefe jedoch von 765 auf $933 \mu\text{g g}^{-1}$ zunahm. Der extreme Rückgang des C_{mik} -Gehaltes in 0-5 cm Bodentiefe konnte wohl vor allem deshalb nachgewiesen werden, da die Bodenprobenahme unmittelbar im Anschluß an das Brennen erfolgte. Außerdem ist der Eingriff in Manaus (vom Primärwald zum Anbau) als gravierender einzuschätzen als der in *Cumarú* (vom Sekundärwald zum Anbau).

Tabelle 34 Mikrobielle Biomasse und mikrobielle Respiration im traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) im Vergleich mit der Ausgangsvegetation (4-jährigen Brache) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Cumarú 30.7.1993 (35 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	0-10 cm			Differenz (%)	10-20 cm		
	Brache	Anbau	T-Test		Brache	Anbau	T-Test
C_{mik} (mg kg ⁻¹)	134	123	ns		59	62	ns
P_{mik} (mg kg ⁻¹)	17,2	14,5	*	-16	9,2	9,7	ns
basale Respiration (mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹)	0,27	0,21	*	- 22	0,13	0,10	ns
induzierte Respiration (mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹)	3,0	2,4	***	- 20	3,1	3,1	ns
$C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ ($\cdot 100$) (%)	1,28	1,28	ns		0,91	0,99	ns
$P_{\text{mik}}/P_{\text{t}}$ ($\cdot 100$) (%)	17,2	10,9	*	- 37	8,0	7,4	ns
$P_{\text{mik}}/P_{\text{i}}$	6,4	2,4	***	-63	4,6	4,9	ns
$C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$	7,5	8,0	ns		7,7	6,2	ns
$q\text{CO}_{2\text{i}}$ (mg CO ₂ h ⁻¹ mg C _{mik} ⁻¹)	0,24	0,22	ns		0,67	0,52	ns
$q\text{CO}_2$ (mg CO ₂ h ⁻¹ mg C _{mik} ⁻¹)	0,020	0,019	ns		0,025	0,015	ns

Das Niveau des C_{mik} -Gehaltes liegt bei LUIZÃO et al. (1991) um das 7 - 10fache über den in Cumarú gemessenen Werten. Hauptursache hierfür dürfte, wie bereits erwähnt, die unterschiedliche Nutzungsgeschichte der Untersuchungsflächen sein. In Manaus handelt es sich um einen Primärwald, in Cumarú um eine bereits mehrfach ackerbaulich genutzte Sekundärwaldfläche (Produktivitätsspirale!, vgl. auch IV 2.2.2). Ein weiterer Grund für das höhere C_{mik} -Niveau in Manaus dürfte auch die abweichende Beprobungstiefe sein, da in 0-5 cm höhere Gehalte gemessen werden als in 0-10 cm Bodentiefe (vgl. IV 2.2.2).

Dennoch muß bezweifelt werden, daß das unterschiedliche C_{mik} -Niveau der beiden Untersuchungen ausschließlich auf tatsächlich vorhandenen Unterschieden zwischen den C_{mik} -Gehalten beruht. Es ist wahrscheinlich, daß auch unterschiedliche Bedingungen vor und während der Analyse sowie verschiedene Analysemethoden (siehe auch Kapitel III) das Analyseergebnis beeinflußt haben. Eine Vergleichbarkeit der absoluten Werte ist daher im Grunde nicht gegeben (es existiert kein internationaler Standard).

Auch JÖRGENSEN et al. (1994) fanden in Norddeutschland unter Weizen (0-10 cm) mit 180-363 mg C kg⁻¹ wesentlich höhere Gehalte, wenn man bedenkt, daß es sich um Anbauflächen

handelt. Doch auch hier ist die Vergleichbarkeit sehr in Frage zu stellen, abgesehen davon, daß es sich um ganz unterschiedliche Böden handelt. Allein das deutlich höhere Nutzungsniveau (Düngung, Erträge etc.) wird einen Einfluß auf die mikrobielle Biomasse haben.

Mikrobieller Biomasse-Phosphor (P_{mik})

Die P_{mik} -Konzentration ist während der Anbauphase signifikant um 16 % von 17,2 auf 14,5 mg kg⁻¹ zurückgegangen (Tabelle 34). Da gleichzeitig die P_t - und P_i -Konzentrationen ansteigen, führt dieses dazu, daß auch die Quotienten P_{mik}/P_t sowie P_{mik}/P_i zurückgehen. Die Bedeutung der mikrobiellen Biomasse als Speicherkompartiment für Phosphor ist in der Brache mit 17,2 % deutlich größer als in der Anbaufläche (10,9 %). Sie zeigt sich auch im Quotienten P_{mik}/P_i , der in der Brache 6,4 beträgt, im Anbau lediglich 2,4. Diese Tendenz deckt sich mit Ergebnissen von JÖRGENSEN (1994) aus Westeuropa, der beide Quotienten nach den Nutzungsformen folgendermaßen reihete: Waldböden > Grünlandböden > Ackerböden.

Mikrobielle Respiration

Der Rückgang der mikrobiellen Respiration ist mit 22 % (basale Respiration) bzw. 20 % (induzierte Respiration) gegenüber der Brache deutlich (Tabelle 34). Er ist auf die Bodentiefe 0-10 cm beschränkt. Die leichte Abnahme der mikrobiellen Quotienten ($q\text{CO}_2$ bzw. $q\text{CO}_{2i}$) in der Anbaufläche ist weder in 0-10 noch in 10-20 cm Bodentiefe signifikant.

TOLAND & ZAK (1994) fanden in Untersuchungen in einem Waldökosystem in Kanada, daß der Kahlschlag von Eiche und Ahorn keinen Effekt auf die jährliche mikrobielle Respirationsrate des Bodens hatte. Ihre Schlußfolgerung war, daß sich eine Erhöhung der Respirationsrate, verursacht durch den Kahlschlag, und eine Abnahme der Respirationsrate, bedingt durch eine Reduzierung der Wurzelatmung, die Waage hielten.

3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der traditionellen Anbauphase

Die Untersuchung der Veränderungen der Bodeneigenschaften im Verlauf der Anbauphase zeigt, daß der Effekt des Brennens auf die meisten der Bodenparameter erst nach dem Einsetzen starker Regenfälle eintritt. Das gilt sowohl für den pH-Wert als auch für die enzyma-

tischen Aktivitäten. Ein direkter Temperatureffekt kann bei keinem der Bodenparameter zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Bei dem Vergleich der Brache (Referenz) mit dem traditionellen Anbau zum Zeitpunkt des Einsetzens der Sukzession der Brachevegetation (Bilanzierung des Anbaueffektes) zeigen sich teilweise deutliche Veränderungen der chemischen und biologischen Bodeneigenschaften (0-10 cm). Die Folgen des traditionellen Anbaus lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- (a) Abnahme der Bodenazidität ($\text{pH} \uparrow$, $\text{H}^+ \downarrow$)
- (b) Zunahme der Konzentration basischer Kationen, insbesondere von Calcium und Kalium (Basensättigung \uparrow)
- (c) Abnahme der NH_4^+ -Konzentration, Zunahme der NO_3^- -Konzentration
- (d) Zunahme der P_i -Konzentration, wobei in Cumarú $\frac{3}{4}$ auf die Düngung und $\frac{1}{4}$ auf das Brennen zurückzuführen sind
- (e) Abnahme der Aktivität der sauren und der basischen Phosphatase
- (f) Rückgang der P_{mik} -Konzentration und der mikrobiellen Respiration
- (g) Tendenzielle Abnahme des C_{org} -Gehaltes

Der Vergleich der Ergebnisse der Bilanzierung des Anbaueffekts mit jenen des Verlaufs der Anbauphase macht die Problematik zeitlich punktueller Probenahmen deutlich. Dies zeigt das Beispiel der β -Glucosidase-Aktivität. Die Aktivitäten in Anbau- und Brachefläche unterscheiden sich zum Zeitpunkt der Bilanzierung statistisch nicht. Fast während der gesamten Anbauphase wies die β -Glucosidase jedoch teils deutlich geringere Aktivitäten auf als in der Brachefläche, was auf eine veränderte Dynamik der organischen Substanz hindeutet.

Ähnlich problematisch ist die Diskussion der Nährstoffkonzentrationen, wie den basischen Kationen und dem anorganischem Phosphor. Die höheren Gehalte im Boden der Anbauflächen spiegeln in keinster Weise eventuell aufgetretene Verluste, z.B. durch Auswaschung, wider, also Prozesse, die für die nachhaltige Produktivität des Nutzungssystems maßgeblich sind.

Da eine kontinuierliche Beprobung sowohl aus arbeitstechnischen als auch wirtschaftlichen Gründen in den meisten Fällen nicht möglich sein dürfte, müßten die Bodenprobenahmen gezielt erfolgen, d.h. in Abhängigkeit von bestimmten landwirtschaftlichen Aktivitäten oder klimatischen Ereignissen.

4 Modifizierte Anbausysteme

4.1 Anbau ohne Brennen

Das Brennen der Brachevegetation macht sowohl vom ökologischen (Belastung der Erdatmosphäre mit Treibhausgasen) als auch vom agronomischen Standpunkt (Nährstoffverluste) die Problematik des traditionellen Anbaus aus. So ist es nicht nur naheliegend, sondern geradezu unabdingbar, zu untersuchen, inwieweit und unter welchen Bedingungen ein Anbau von Mais und Maniok unter Verzicht auf das Abbrennen der Brachevegetation möglich ist.

4.1.1 Veränderung der chemischen Bodenparameter durch den Verzicht auf das Brennen

Veränderung chemischer Bodenparameter im Verlauf der Anbauphase

Der Verzicht auf das Brennen der Brachevegetation hat weitreichende Folgen für die meisten chemischen Bodencharakteristika. So bleibt der durch das Brennen verursachte pH-Anstieg (vgl. 3.1) aus (Abbildung 19 a) - der pH(CaCl₂)-Wert verändert sich im Gegensatz zum traditionellen Anbau nur wenig und steigt während der gesamten Anbauphase nicht über pH 5,0. Zum Zeitpunkt der Maniokernte, also zum Ende der Anbauphase, liegt die Bodenreaktion in beiden Anbausystemen mit etwa pH 5 auf demselben Niveau.

Der C_{org}-Gehalt steigt im Anbau ohne Brennen vom Abschlagen der Brachevegetation bis nach der Maissaat von 8,4 auf 12,2 mg kg⁻¹ an und bleibt bis zum Ende der Anbauphase auf diesem Niveau (11,2 mg kg⁻¹ zum Zeitpunkt der Maniokernte). Die Ursache hierfür dürfte sein, daß die als Mulchdecke liegengelassene abgeschlagenen Pflanzenmaterial im Laufe der Zeit verrottete und umgesetzt wurde.

Die Konzentrationen der basischen Kationen zeigen übereinstimmende Verläufe. Es kommt sowohl bei den von Calcium und Magnesium als auch bei Kalium zu einem Konzentrationsanstieg, der jedoch hinter dem des traditionellen Anbaus zurückbleibt. Die Ca+Mg-Konzentration steigt von 1,27 auf 2,44 cmol(+) kg⁻¹ an, um zum Ende der Anbauphase auf 1,40 cmol(+) kg⁻¹ zurückzufallen. Die Kaliumkonzentration steigt von 0,064 auf 0,137 cmol(+) kg⁻¹ an, und sinkt bei der Maniokernte auf 0,44 cmol(+) kg⁻¹ ab. Deutlich ist hier der Effekt der Kaliumdüngung (s. III 3.2.1) zum Zeitpunkt der Maissaat.

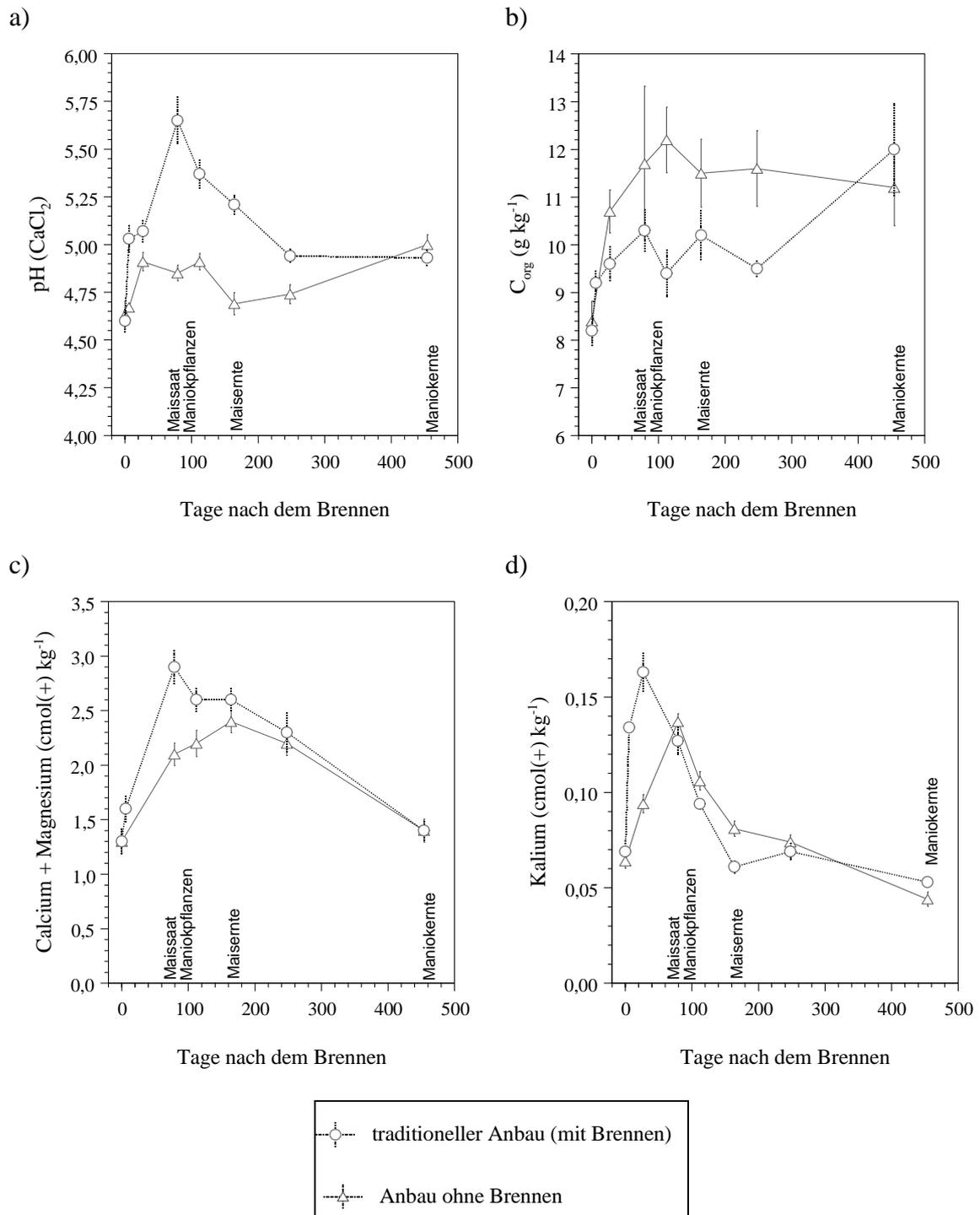


Abbildung 19 a-d Veränderung des pH(CaCl₂), C_{org}-Gehaltes, der Calcium+Magnesium- und der Kaliumkonzentration im Verlauf des traditionellen Anbausystems und des Anbausystems ohne Brennen in Cumarú, Bodentiefe 0-10 cm (| = Standardfehler, n=7)

Anmerkung: die Achsenbeschriftung "Tage nach dem Brennen" bezieht sich auf das Brennen des traditionellen Anbausystems - die Beprobung im Anbausystem ohne Brennen erfolgte zum selben Zeitpunkt

Bilanzierung des Anbaueffektes auf die chemischen Bodencharakteristika zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation

Im Anbau ohne Brennen zeigen sich zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation ausschließlich in der Bodentiefe 0-10 cm signifikante Unterschiede gegenüber dem traditionellen Anbau. In 10-20 cm sind sowohl in Cumarú als auch in Iracema die auftretenden Unterschiede nicht signifikant (T-Test, $p < 0,05$; Tabelle 35).

Im Anbau ohne Brennen kommt es nicht zu dem im traditionellen Anbau beobachteten pH-Anstieg (vgl. 3.3.1). In Cumarú und Iracema liegen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ mit 5,85 bzw. 5,47 sowie der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ mit 4,69 bzw. 4,21 jeweils signifikant unter den im traditionellen Anbau gemessenen pH-Werten (Tabelle 35). Das äußert sich an beiden Standorten in einer erhöhten H^+ -Konzentration und in Iracema darin, daß Al^{3+} -Ionen nachweisbar sind (ns). In Iracema ist darüber hinaus im Anbau ohne Brennen die Summe der austauschbaren basischen Kationen mit $1,40 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ gegenüber dem traditionellen Anbau ($1,88 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) signifikant geringer. Entscheidend ist dabei die signifikante, durch das Brennen bedingte, Zunahme der Calciumkonzentration in Höhe von $0,45 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ($1,43$ gegenüber $0,98 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$; Tabelle 35). Auch die Mg-Konzentration ist im Anbau ohne Brennen niedriger als im traditionellen Anbau (ns). Gleiches gilt für die Basensättigung mit 31 % im Anbau ohne Brennen gegenüber 39 % im traditionellen Anbau.

Der C_{org} -Gehalt ist in Cumarú im Anbau ohne Brennen mit $11,6$ gegenüber $9,5 \text{ g kg}^{-1}$ im traditionellen Anbau signifikant erhöht, in Iracema bleibt er unverändert bei $10,5 \text{ mg kg}^{-1}$, zum Zeitpunkt der Maniokernte liegt er bei $12,0 \text{ g kg}^{-1}$.

Unverändert bleibt an beiden Standorten der Gesamt-N-Gehalt. Im Gegensatz dazu ist die NH_4^+ -Konzentration im Anbau ohne Brennen signifikant erhöht (in Cumarú $16,7$ gegenüber $12,7 \text{ mg kg}^{-1}$, in Iracema $14,9$ gegenüber $12,1 \text{ mg kg}^{-1}$). Ursache ist der geringe pH-Wert im Anbau ohne Brennen, wodurch die Nitrifikation des Ammoniums gehemmt wird.

Die P_i -Konzentration ist in Cumarú durch den Verzicht auf das Brennen mit $4,6$ gegenüber $5,9 \text{ mg kg}^{-1}$ signifikant niedriger. In Iracema unterscheiden sich beide Anbausysteme nicht (Tabelle 35).

Tabelle 35 Chemische Bodenparameter im Anbau ohne Brennen im Vergleich zum traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuche Cumarú (30.7.1993, 35 Wochen nach dem Brennen) und Iracema (2.8.1993, 34 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	Cumarú						Iracema					
	0-10 cm			10-20 cm			0-10 cm			10-20 cm		
	Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test
pH(H ₂ O)	6,03	5,85	*	5,26	5,28	ns	5,77	5,47	*	5,28	5,105	ns
pH(CaCl ₂)	4,94	4,69	**	4,08	4,06	ns	4,62	4,21	**	4,15	4,05	ns
C _{org} (g kg ⁻¹)	9,5	11,6	*	6,2	6,4	ns	10,5	10,5	ns	7,1	6,3	ns
N _t (g kg ⁻¹)	0,9	1,0	ns	0,7	0,8	ns	1,0	1,0	ns	0,7	0,7	ns
NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	12,7	16,7	*	13,0	14,5	ns	12,1	14,9	*	10,3	9,0	ns
NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	4,3	3,5	ns	3,1	2,5	ns	-	-		-	-	
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	5,9	4,6	***	2,0	2,3	ns	4,1	4,5	ns	2,7	2,3	ns
P _i (OL) (mg kg ⁻¹)	10,5	8,7	ns	4,8	4,7	ns	-	-		-	-	
P _t (g kg ⁻¹)	0,013	0,013	ns	0,013	0,014	ns	0,010	0,010	ns	0,011	0,010	ns
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,8	1,8	ns	-	-	ns	1,43	0,98	***	-	-	
Ca ²⁺ +Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,26	2,17	ns	0,61	0,56	ns	1,79	1,30	***	0,41	0,33	ns
Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,47	0,39	ns	-	-	ns	0,36	0,32	ns	-	-	
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,069	0,074	ns	0,049	0,049	ns	0,06	0,07	ns	0,04	0,04	ns
Na ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,03	0,03	ns	0,03	0,3	ns	0,03	0,03	ns	0,02	0,02	ns
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,00	0,00	ns	0,20	0,21	ns	0,00	0,03	ns	0,36	0,47	ns
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,16	2,69	*	2,76	2,93	ns	2,9	3,2	ns	3,1	2,8	ns
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	2,35	2,27	ns	0,69	0,64	ns	1,88	1,40	***	0,47	0,395	ns
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	4,51	4,96	ns	3,65	3,78	ns	4,82	4,60	ns	3,91	3,66	ns
Basensättigung (%)	52	46	ns	19	17	ns	39	31	**	12	11	ns

4.1.1.1 Phosphorbilanz im traditionellen Anbausystem und im Anbau ohne Brennen am Standort Cumarú

Die P_i -Konzentration beträgt vor dem Brennen im traditionellen Anbausystem (mit Brennen) in 0-10 cm Bodentiefe $3,7 \text{ mg kg}^{-1}$, im Anbau ohne Brennen (Behandlung 4) $4,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabelle 36). Sie unterscheiden sich nicht von der Konzentration in der Brache (Behandlung 1 = Referenz), die $3,9 \text{ mg kg}^{-1}$ beträgt. Von dem Schlagen der Brachevegetation ist folglich kein unmittelbarer Effekt auf die P_i -Konzentration des Bodens in 0-10 cm ausgegangen.

Nach dem Brennen kommt es im traditionellen Anbau zu einem Anstieg der P_i -Konzentration um 2 bzw. 3 mg kg^{-1} . Eine Woche nach dem Brennen beträgt die Konzentration $5,7 \text{ mg kg}^{-1}$, 4 Wochen nach dem Brennen $6,7 \text{ mg kg}^{-1}$. Auch im Anbausystem ohne Brennen ist ein Anstieg der P_i -Konzentration nachweisbar: dieser ist nach 4 Wochen mit $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ jedoch nur halb so groß ist wie im traditionellen Anbausystem. Die Differenz zwischen beiden Anbausystemen erklärt sich praktisch durch den P-Input über die Asche. HÖLSCHER (1995) fand in der Asche einer 7-jährigen Brache (Chronosequenz *Marcelino*) P-Konzentrationen von $0,8\text{-}5,0 \text{ mg g}^{-1}$ (Median = $2,8 \text{ mg g}^{-1}$), was rein rechnerisch einer Konzentrationszunahme in 0-10 cm Bodentiefe von $0,4\text{-}11,5 \text{ mg P kg}^{-1}$ (Median = $3,7 \text{ mg P kg}^{-1}$) entspricht (Bodendichte: $1,3 \text{ g cm}^{-3}$; Daten nicht dargestellt). DENICH & KATO (1993) geben mit $4,7 \text{ mg g}^{-1}$ höhere P-Konzentrationen in der Asche des Cumarú-Versuches an, wobei aber nicht die gesamte Asche der Analyse zugeführt wurde, sondern nur der in heißer Salzsäure (1N) lösliche Anteil (DENICH, pers. Mitteilung). Folglich kann auch nicht der P-Eintrag über die Gesamtaschemenge hochgerechnet werden. Nimmt man nun an, daß die P-Konzentration in der Gesamtasche in Cumarú ähnliche Werte aufwies wie bei HÖLSCHER (1995), also $2,8 \text{ mg g}^{-1}$ (Median) wäre der P-Eintrag in Cumarú mit $0,3\text{-}4,4 \text{ mg P kg}^{-1}$ Boden (Median = $1,7 \text{ mg P kg}^{-1}$) nur halb so hoch wie in der 7-jährigen Brache. Grund ist, daß beim Brennen der 7-jährigen Brachevegetation mit $695\text{-}2996 \text{ kg ha}^{-1}$ (Median = 1703 kg ha^{-1}) etwa doppelt so hohe Aschemengen anfielen als beim Brennen der 4-jährigen Brache in Cumarú ($517\text{-}1143 \text{ kg ha}^{-1}$, Mittel = 811 kg ha^{-1}). Der durch das Brennen bedingte P_i -Anstieg im Boden beträgt also im Median $1,7 \text{ mg kg}^{-1}$.

Dennoch kommt es in beiden Anbausystemen zu einem nicht unmittelbar erklärbaren Anstieg der P_i -Konzentration von ca. $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Als hauptsächliche P-Quellen kommen zu diesem Probenahmezeitpunkt ein später Effekt des Schlagens der Brachevegetation in Betracht, dadurch verursacht, daß erst relativ spät (im Dezember) die ersten Regenfälle fielen. Denn daß der Beginn der Regenzeit einen Einfluß auf die P_i -Konzentration haben könnte, wird dadurch belegt, daß es auch in der Referenzfläche, der 4-jährigen Brache, zu einem Anstieg die P_i -Konzentration Ende Dezember um knapp 1 mg kg^{-1} kommt. Also kann man von einem Effekt der Wiederbefeuchtung des Bodens und einem damit einhergehenden Mineralisierungsschub als Ursache für die erhöhte P_i -Konzentration ausgehen. Im traditionellen Anbau liegt der P_i -

Anstieg jedoch auch im Bereich dessen, was sich durch den P-Ascheeintrag erklären ließe (s.o.).

11 Wochen nach dem Brennen wurde eine drastische Zunahme der P_i -Konzentration auf $18,1 \text{ mg kg}^{-1}$ gemessen (Tabelle 36). Drei Wochen zuvor war der Mais gesät und mineralisch gedüngt worden. Die ausgebrachte P-Düngermenge betrug $28 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, was bei einer Bodendichte von $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ einer theoretischen Konzentrationserhöhung von $9,4 \text{ mg P kg}^{-1}$ in 0-10 cm Bodentiefe entspricht. Bilanziert man die P-Einträge, so zeigt sich, daß die Düngergabe nicht vollends den Anstieg der P-Konzentration auf $18,1 \text{ mg kg}^{-1}$ erklärt. Diese liegt um $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$ über dem rechnerisch ermittelten P-Gehalt von $16,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabelle 36). Es ist zu vermuten, daß diese Differenz an anorganischem Phosphor (P_i) aus der mikrobiellen Biomasse freigesetzt wurde. Denn deren Gehalt ist noch 8 Monate nach dem Brennen im traditionellen Anbausystem $2,8 \text{ mg kg}^{-1}$ niedriger als in der Brache (Referenz) bzw. $4,6 \text{ mg kg}^{-1}$ geringer als im Anbausystem ohne Brennen (vgl. 3.3.3, Tabelle 34).

Auch in Untersuchungen anderer Autoren wurde ein Anstieg der Konzentration an anorganischem P_i festgestellt. Dabei wurden Bodenproben entweder nur einer Hitzebehandlung unterzogen (SERRASOLSAS & KHANNA 1995b) oder - wie im vorliegenden Fall - Pflanzenmaterial verbrannt (ANDRIESSE & KOOPMANS 1984, ANDRIESSE & SCHELHAAS 1987 in Malaysia, SAA et al. 1993 in Spanien, ROMANYÀ et al. 1994 in Australien), so daß es zu einem Eintrag an Asche kam. Als mögliche Ursachen für den P_i -Anstieg werden genannt: (a) P-Freisetzung durch Mineralisierung der mikrobiellen Biomasse, (b) Abbau der organischen Substanz durch chemische Veränderungen des Bodenmilieus, (c) Mineralisierung organischen Phosphors und (d) die Lösung von leicht-extrahierbaren Eisen- und Aluminiumphosphaten (SERRASOLSAS & KHANNA 1995b).

Im Gegensatz zu der P-Bilanz im traditionellen Anbausystem ist die Bilanz im Anbau ohne Brennen mit $-5,9 \text{ mg kg}^{-1}$ negativ (Tabelle 36). Es ist hier also scheinbar nicht zu einer Mineralisierung des mikrobiell gebundenen Phosphors gekommen, sondern im umgekehrten Prozeß anorganisches P_i in der mikrobiellen Biomasse festgelegt worden ist: extrahierbares P ist aufgrund des weiten C:P-Verhältnisses des Mulchmaterials immobilisiert worden. Dafür sprechen auch die erhöhten P_{mik} -Gehalte, die 8 Monate nach dem Brennen analysiert wurden. Sie liegen zwar mit $19,1 \text{ mg kg}^{-1}$ nur um $1,9 \text{ mg kg}^{-1}$ über dem P_{mik} -Gehalt der Brache ($17,2 \text{ mg kg}^{-1}$), jedoch deutlich, und zwar um $4,6 \text{ mg kg}^{-1}$, über dem des Anbausystems mit Brennen ($14,5 \text{ mg kg}^{-1}$; Tabelle 34 und Tabelle 39).

Tabelle 36 Bilanzierung des Gehaltes an extrahierbarem P (P_i(NC)) (mg kg⁻¹) unter Berücksichtigung der Einträge über die Asche und die Düngung sowie des Entzuges durch den Mais in den Anbausystemen mit und ohne Brennen im Feldversuch Cumarú. Bodentiefe 0-10 cm

Zeitreihe	vor dem Brennen	Input über Asche (Min.-Max.)	6 Tage nach dem Brennen	4 Wochen nach dem Brennen	Input über Dünger	3 Wo. n.d. Maissaat (rechner.)	3 Wo. n.d. Maissaat (gemessen)	Differenz	16 Wo. nach dem Brennen (gemessen)	Entzug durch Mais (ohne Spindel)	Maisernte ⁴ (rechner.)	Maisernte (gemessen)	Differenz
traditioneller Anbau (mit Brennen)	3,7	+1,7	5,7***²	6,7 ns	+9,4	=16,1	18,1***	+2,0	11,7**	-4,1	14,0	8,4*	-5,6
		(0,3-4,4)											
Anbau ohne Brennen	4,0	0	4,0 ³	5,3**²	+9,4	=14,7	8,8*	-5,9	9,0 ns	-3,5	5,3	5,9**	+0,6
Differenz (T-Test)	-0,3 ns ¹		+1,7**	+1,4**		+1,4	+9,3**		+2,7*		+8,7	+2,5*	
Brache (Referenz)	3,9			4,7			4,0		5,0			2,7	

¹ T-Test zum Vergleich der beiden Anbausysteme bei ein und derselben Probenahme

² T-Test zum Vergleich aufeinanderfolgender Probenahmen. Das Signifikanzniveau bezieht sich jeweils auf die vorangegangene Probenahme (=Kasten).

Beispiel: die P_i-Konzentration von 5,7 mg kg⁻¹ im traditionellen Anbau 6 Tage nach dem Brennen unterscheidet sich mit einem Signifikanzniveau von p < 0,001 von der vor dem Brennen gemessenen P_i-Konzentration (3,7 mg kg⁻¹).

³ Wert wurde nicht gemessen, sondern von vorangegangener Probenahme übernommen

⁴ Differenz zwischen "3 Wo. n.d. Maissaat" und "Maisentzug"

Verfolgt man die P-Bilanz weiter bis zur Maisernte, stellt man fest, daß bereits 16 Wochen nach dem Brennen (8 Wochen nach der Maissaat) die P_i -Konzentration im Anbausystem mit Brennen deutlich zurückgeht, und zwar um $6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ auf $11,7 \text{ mg kg}^{-1}$, sich jedoch im Anbausystem ohne Brennen nicht verändert hat. Der Maisentzug ist zwar im Anbau mit Brennen mit $4,1 \text{ mg kg}^{-1}$ höher als im Anbau ohne Brennen ($3,5 \text{ mg kg}^{-1}$; zum Zeitpunkt der Ernte bestimmt), was jedoch nicht hinreichend den extremen Rückgang der P-Konzentration im Anbausystem mit Brennen erklärt. Im Anbausystem mit Brennen "fehlen" zum Zeitpunkt der Maisernte in der Bilanz $5,6 \text{ mg P}_i \text{ kg}^{-1}$.

Als Ursachen für den starken Rückgang der P_i -Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe des Anbausystems mit Brennen kommen in Betracht: (a) P-Adsorption, (b) Ausfällung von P_i durch Anstieg des pH-Wertes, (c) Immobilisierung von P_i in der mikrobiellen Biomasse (SERRASOLSAS & KHANNA 1995b) - Dem widerspricht, daß die P_{mik} -Konzentration 8 Monate nach dem Brennen gegenüber der Brache abgenommen hat (s.o.). Es ist jedoch nicht bekannt, wie hoch die P_{mik} -Konzentration zu Beginn der Anbauphase war, (d) P-Auswaschung - In 10-20 cm stieg die P_i -Konzentration während der Maiskultur um 1 mg kg^{-1} (16 Wochen nach dem Brennen) und zum Zeitpunkt der Maisernte um $1,4 \text{ mg kg}^{-1}$. Obwohl dieser Konzentrationsanstieg statistisch nicht signifikant ist, könnte er ein Hinweis darauf sein, daß es zu vertikalen P-Verlagerungen gekommen ist, u.U. in tiefer als 20 cm gelegene Bodenschichten. HÖLSCHER (1995) gibt zwar nur geringe P-Austragsraten von $0,3\text{-}0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ an (was einer Abnahme der P_i -Konzentration um lediglich $0,23\text{-}0,38 \text{ mg kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ entspräche), diese Angaben beruhen jedoch auf Messungen der P-Konzentrationen im Sickerwasser in 105 cm Bodentiefe. Nicht erfaßt wurden dabei P-Verlagerungen aus dem Oberboden, die oberhalb 105 cm Bodentiefe verblieben. Da einerseits in 0-20 cm deutlich höhere P-Konzentrationen vorliegen als in tieferen Bodenschichten und andererseits die P-Mobilität im Boden sich i.a. nur auf geringe räumliche Distanzen beschränkt, ist es sehr wahrscheinlich, daß der P-Austrag aus der Bodenschicht 0-20 cm ein höheres Niveau hat, als die von HÖLSCHER (1995) angegebenen Werte.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die mikrobielle Biomasse in intensivem Austausch mit dem anorganischen P-Pool steht. Das belegt auch die enge negative Korrelation ($r = -0,9139^{***}$, $n=8$) zwischen den P_i - und P_{mik} -Konzentrationen, errechnet aus Daten, die zu Beginn der natürlichen Sukzession der Brachevegetation erhoben wurden. Es scheint, daß die mikrobielle Biomasse im traditionellen Anbau als Quelle für extrahierbares P fungiert, im Anbau ohne Brennen dagegen als P_i -Sink (wie übrigens auch in der Brache).

Betrachtet man die P-Dynamik aus Sicht der Pflanzenernährung (wobei wir davon ausgehen, daß der Gehalt an extrahierbarem P dem pflanzenverfügbaren Phosphor entspricht), läßt sich folgendes feststellen:

- (a) im Anbausystem mit Brennen (und mit Düngung) liegt für den Mais - gemessen an dessen Bedarf - zu Beginn der Kultur eine Luxusversorgung mit anorganischem Phosphor vor und
- (b) im Anbausystem ohne Brennen (und mit Düngung) liegen das P-Angebot und der P-Bedarf der Maiskultur enger zusammen. Ohne mineralische P-Düngung läge die P-Versorgung u.U. unter dem Bedarf der Kulturpflanze.

4.1.2 Veränderung der enzymatischen Aktivitäten durch den Verzicht auf das Brennen

Einen Vergleich der relativen Phosphatase-Aktivität (Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm) im traditionellen Anbau mit Brennen und im Anbau ohne Brennen zeigt Abbildung 20. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung der beiden Anbausysteme (Behandlung 2 und 4) gegenüber der Brache (Behandlung 1). Es wird deutlich, daß sowohl in Cumarú als auch in Iracema die Phosphatase-Aktivität in 0-10 cm Bodentiefe des Anbausystems ohne Brennen nicht die vormals im traditionellen Anbau beobachtete Depression zu Beginn der Anbauphase zeigt. Erst zum Zeitpunkt der Maisernte sinkt die Aktivität unter die der Brache ab, sie bleibt jedoch mit jeweils -13 % deutlich über dem Niveau der Aktivität im Anbausystem mit Brennen (-38 % in Cumarú, -31 % in Iracema; Tabelle 37 und Tabelle 38). Auch zum Ende der Anbauphase (Maniokernte) ist der prozentuale Verlust der Phosphatase-Aktivität (gegenüber der Brache) im System ohne Brennen geringer als im Anbau mit Brennen. Im Anbau ohne Brennen beträgt er an beiden Standorten -20 %, im traditionellen Anbau -37 % (Cumarú) bzw. -34 % (Iracema).

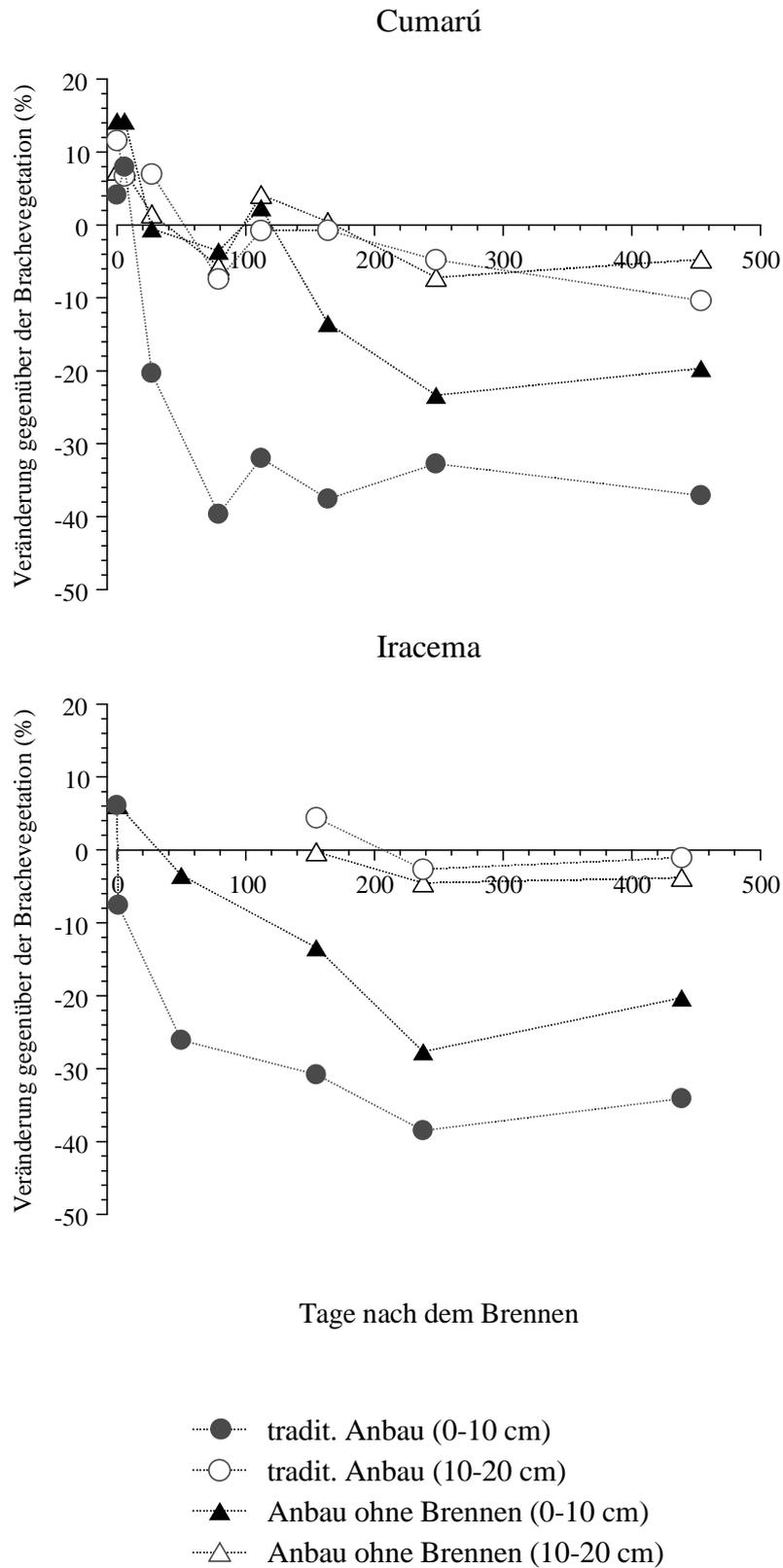


Abbildung 20 Relative Veränderung der Aktivität der sauren Phosphatase im Boden (0-10 und 10-20 cm) gegenüber der Ausgangsvegetation im traditionellen Anbausystem (mit Brennen) und im Anbausystem ohne Brennen, Cumarú und Iracema 1992-94

Tabelle 37 Enzymatische Aktivitäten im Anbausystem ohne Brennen im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem mit Brennen (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Cumarú 30.7.1993 (35 Wochen nach dem Brennen) (n=7)

Bodentiefe	0-10 cm				10-20 cm		
	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Differenz (%)	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	752	857	ns	(+14)	1099	1071	ns
basische Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	36,7	51,9	ns	(+41)	33,9	46,4	ns
Urease ($\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)	25,3	27,6	ns	(+9)	18,7	17,9	ns
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	18,7	29,1	***	+56	11,7	10,1	ns

Tabelle 38 Enzymatische Aktivitäten im Anbausystem ohne Brennen im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem mit Brennen (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Iracema 2.8.1993 (34 Wochen nach dem Brennen) (n=7)

Bodentiefe	0-10 cm				10-20 cm		
	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Differenz (%)	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	1286	1559	*	+21	1741	1688	ns
basische Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	45,2	75,5	**	+67	56,1	55,5	ns
Urease ($\mu\text{g N g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$)	23,5	26,3	ns	(+12)	16,1	15,4	ns
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	23,4	30,1	ns	(+29)	9,7	8,6	ns

In der Bodentiefe 10-20 cm liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Anbausystemen vor (Tabelle 37 und Tabelle 38). Die Aktivitätsverluste liegen jeweils unter 10 % und unterscheiden sich nicht signifikant von dem Niveau der Brache. Ursache dürfte vor allem sein, daß sich die Phosphatase-Aktivität beeinflussenden Faktoren wie der pH-Wert und die P_i -Konzentration in dieser Bodentiefe nur in geringem Maße veränderten (vgl. IV 4.1.1). Das Ausbleiben eines direkten Temperatureffektes kommt als Erklärung nicht in Betracht, da dieser nicht einmal für die Bodentiefe 0-10 cm nachgewiesen werden konnte.

Die Urease-Aktivität unterscheidet sich im Anbau ohne Brennen weder in Cumarú noch in Iracema signifikant vom traditionellen Anbau mit Brennen (Tabelle 37 und Tabelle 38). In 0-10 cm Bodentiefe ist die Aktivität an beiden Standorten im Anbausystem ohne Brennen nicht signifikant erhöht (+9 bzw. +12 %). Im Verlauf der Anbauphase (Anhang 8a und b) liegt die Urease-Aktivität in Cumarú in beiden Anbausystemen (Bodentiefe 0-10 cm) fast durchweg unter dem Niveau der Brache. Ausnahme: 4 Wochen nach dem Brennen, wo die Aktivität in den beiden Anbausystemen gegenüber der Brache erhöht ist (ns). Die Unterschiede sind jedoch durchweg nicht signifikant, was vor allem an der großen Streuung der Daten liegt. In Iracema liegt kein eindeutiger Trend.

Die β -Glucosidase-Aktivität ist in 0-10 cm Bodentiefe in Cumarú mit 29,1 im Anbausystem ohne Brennen gegenüber 18,7 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ im traditionellen Anbau erhöht ($p < 0,001$), in Iracema mit 30,1 gegenüber 23,4 $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Die β -Glucosidase zeigt in Cumarú im Anbausystem ohne Brennen vom 27. Tag an bis zur Maisernte (Bodentiefe 0-10 cm) durchweg höhere Aktivitäten als im Anbau mit Brennen (Anhang 8a). In Iracema ist dieser Trend weniger deutlich (Anhang 8c). In 10-20 cm Bodentiefe sind die Unterschiede zwischen den Enzymaktivitäten der beiden Anbausysteme deutlich geringer und i.a. nicht signifikant (Anhang 8b und 8d).

4.1.3 Veränderung der mikrobiellen Biomasse (C_{mik} , P_{mik}) und mikrobiellen Respiration durch den Verzicht auf das Brennen

Der C_{mik} -Gehalt ist im Anbausystem ohne Brennen in beiden Bodentiefen leicht, jedoch nicht signifikant gegenüber dem traditionellen Anbau erhöht (Tabelle 39). Signifikant ist der Anstieg der mikrobiellen Respiration in 0-10 cm Bodentiefe, der mit +33 (basale Respiration) bzw. +29 % (induzierte Respiration) deutlich ausfällt. $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$, $C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$, $q\text{CO}_2$ bzw. $q\text{CO}_2\text{i}$ zeigen keine wesentlichen Veränderungen.

Zu einem deutlichen Anstieg von +32 % kommt es bei der Konzentration des mikrobiellen Biomasse-P im Anbau ohne Brennen in der Bodentiefe 0-10 cm gegenüber dem traditionellen Anbau (Tabelle 39). Dieser Anstieg ist dafür verantwortlich, daß sowohl der P_{mik}/P_t (ns) als auch der P_{mik}/P_i -Quotient ($p < 0,01$) ansteigen bzw. der $C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$ -Quotient abnimmt (ns). Die gleichzeitig signifikant niedrigere P_i -Konzentration gegenüber dem traditionellen Anbau (s. Tabelle 35) deutet darauf hin, daß es im Anbausystem ohne Brennen zu einer P-Immobilisierung durch eine erhöhte mikrobielle Aktivität kommt.

Tabelle 39 Mikrobielle Biomasse und mikrobielle Respiration im Anbausystem ohne Brennen im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Cumarú 30.7.1993 (35 Wochen nach dem Brennen) (n=7)

	Bodentiefe 0-10 cm				10-20 cm		
	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test	Differenz (%)	tradit. Anbau mit Brennen	Anbau ohne Brennen	T-Test
C_{mik} (mg kg ⁻¹)	123	133	ns	(+8)	62	71	ns
P_{mik} (mg kg ⁻¹)	14,5	19,1	***	+32	9,7	9,4	ns
basale Respiration (mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹)	0,21	0,28	**	+33	0,10	0,08	ns
induzierte Respiration (mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹)	2,4	3,1	***	+29	3,1	3,3	ns
$C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ ($\cdot 100$) (%)	1,28	1,17	ns	(-9)	0,99	1,06	ns
P_{mik}/P_t ($\cdot 100$) (%)	10,9	14,3	ns	(+31)	7,4	5,8	ns
P_{mik}/P_i	2,4	4,1	**	+71	4,9	3,9	ns
$C_{\text{mik}}/P_{\text{mik}}$	8,0	7,0	ns	(-13)	6,2	7,1	ns
qCO ₂ (mg CO ₂ h ⁻¹ mg C _{mik} ⁻¹)	0,019	0,021	ns		0,015	0,011	ns
qCO _{2i} (mg CO ₂ h ⁻¹ mg C _{mik} ⁻¹)	0,22	0,23	ns		0,52	0,57	ns

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Effekt des Verzichtes auf das Brennen in höchstem Maße standortabhängig ist. Von der Tendenz her kommt es zu den folgenden Veränderungen gegenüber dem traditionellen Anbau mit Brennen: (a) der pH bleibt auf einem deutlich geringeren Niveau (etwa dem der Brachefläche), (b) die Konzentration an basischen Kationen (Ca, K) sowie anorganischem P (P_i) ist niedriger, (c) die H^+ - und Al^{3+} -Konzentrationen sind höher, (d) die biologischen Aktivitäten und der Gehalt an mikrobieller Biomasse sind höher (Phosphatasen, Biomasse-P).

4.2 Integration von Leguminosen

Anbau mit Bohnen (*Vigna unguiculata*)

Die Integration von *Vigna unguiculata* in das Mais-Maniok-Anbausystem führte, abgesehen von dem Düngeneffekt (40 kg ha^{-1} eines NPK-Düngers der Formulierung '10-28-20'; vgl. III 3.2.1) in 0-10 cm Bodentiefe, zu keiner Veränderung der chemischen und biologischen Bodencharakteristika (Tabelle 38). Einzige Ausnahme ist die signifikante Abnahme der β -Glucosidase-Aktivität um 36 % im Anbau mit *Vigna* in Iracema.

Tabelle 40 Chemische und biologische Bodenparameter im Anbau mit *Vigna unguiculata* und *Canavalia ensiformis* im Vergleich zum traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Sukzession der Sekundärvegetation) in der Bodentiefe 0-10 cm, Feldversuche Cumarú (35 Wochen nach dem Brennen) und Iracema (34 Wochen nach dem Brennen) (T-Test; n=7)

	Cumarú			Iracema		
	tradit. Anbau	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau mit <i>Canavalia</i>	tradit. Anbau	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau mit <i>Canavalia</i>
C_{org} (g kg^{-1})	9,5	10,1 ns	10,9 *	10,5	9,8 ns	11,4 ns
N_t (g kg^{-1})	0,89	0,89 ns	1,03 **	1,01	1,00 ns	1,00 ns
$P_i(\text{NC})$ (mg kg^{-1})	5,9	7,3 *	5,1 ns	4,1	6,3 *	4,7 ns
K^+ ($\text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$)	0,069	0,080 ns	0,053 *	0,059	0,074 *	0,056 ns
P_{mik} (mg kg^{-1})	14,5	16,0 *	-	-	-	-
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	18,7	17,8 ns	21,9 ns	23,4	15,0 *	18,0 ns

Der Effekt der Düngung ist besonders deutlich bei Phosphor. Die P_i -Konzentration ist sowohl in Cumarú als auch in Iracema mit 7,3 gegenüber 5,9 mg kg^{-1} bzw. 6,3 gegenüber 4,1 mg kg^{-1} signifikant höher als im traditionellen Anbau. Die tatsächliche Steigerung der P_i -Konzentration beträgt somit 1,4 bzw. 2,2 mg kg^{-1} . Da der P-Eintrag über die Düngung 11,2 $\text{kg P}_2\text{O}_5$ pro Hektar betrug, was einer theoretischen Steigerung der P_i -Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe (Bodendichte = $1,3 \text{ g cm}^{-3}$) von 3,8 mg kg^{-1} entspräche, ist davon auszugehen, daß die erhöhte P_i -Konzentration im Anbau mit *Vigna* ausschließlich auf die Düngergabe zurückzuführen ist. In Cumarú ist die P_{mik} -Konzentration mit 16,0 gegenüber 14,5 mg kg^{-1} erhöht.

Auch die Kaliumkonzentration ist im Anbau mit *Vigna* in 0-10 cm Bodentiefe an beiden Versuchstandorten erhöht, bedingt durch die K-Düngung (Tabelle 40). Die Düngergabe entspricht einem Kalium-Eintrag von $8 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$.

Anbau mit Bodendecker (*Canavalia ensiformis*)

Ganz anders als die Integration von Bohnen wirkt sich die Integration von *Canavalia ensiformis* aus. Sowohl der C_{org} - als auch der N_{T} -Gehalt sind signifikant gegenüber dem traditionellen Anbau erhöht (0-10 cm Bodentiefe, Tabelle 40). Ursache dürfte die durch den Bodendecker bedingte höhere ober- und unterirdische Phytomasse sein - nach SOUZA COELHO (schriftliche Mitteilung 1994) betrug die Phytomasse der *Canavalia* in Cumarú 2170, in Iracema 360 kg ha^{-1} . Diese dürfte einerseits über den Blattfall, andererseits über die größere Wurzellängendichte langfristig zu einem höheren C_{org} -Gehalt führen. Auf diese Weise ließe sich auch die Zunahme des N_{T} -Gehaltes erklären, da dieser i.a. positiv mit dem C_{org} -Gehalt korreliert ist. Darüber hinaus ist es u.U. zu einem Stickstoffeintrag über eine N-Fixierung der *Canavalia* gekommen.

Auch die Kaliumkonzentrationen in 0-10 cm Bodentiefe beider Anbausysteme unterscheiden sich. In Cumarú ist die K-Konzentration im Anbau mit *Canavalia* mit $0,053 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ signifikant geringer als im traditionellen Anbau ($0,069 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) (Tabelle 40). In Iracema ist der Unterschied nicht signifikant. Ursache dürfte eine relativ hohe Kalium-Aufnahme durch den Bodendecker in Cumarú sein, der sich dort im Gegensatz zu Iracema gut entwickelte (s.o.).

Die Kalium-Aufnahme durch die *Canavalia* trägt dazu bei, daß weniger Kalium aus dem Oberboden ausgewaschen wird (vgl. 3.1). Sie kann folglich als Beitrag zum Erhalt des Kaliums im System gewertet werden, der bei einer Phytomasseproduktion der *Canavalia* von über 2000 kg ha^{-1} , wie in Cumarú, nicht unerheblich ist.

In Iracema konnten generell keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bodendaten des traditionellen Anbau und dem Anbau mit *Canavalia* nachgewiesen werden, was auf das schlechte Wachstum des Bodendeckers zurückzuführen ist.

4.3 Änderung der Art und Menge der Düngergabe

4.3.1 Erhöhung der NPK-Düngung

Die Verdopplung der P-Düngergabe (60 kg gegenüber 28 kg P_2O_5 ha^{-1}) führt zu einer Erhöhung der P_i -Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe von 6,2 auf 12,7 $mg\ kg^{-1}$ ($P_i(NC)$; ns) bzw. von 6,8 auf 9,3 $mg\ kg^{-1}$ ($P_i(OL)$; $p < 0,01$; Tabelle 41). Auch der Gesamt-P-Gehalt zeigt eine ansteigende Tendenz (von 0,018 auf 0,022 $g\ kg^{-1}$; ns).

Tabelle 41 Chemische und biologische Bodenparameter im Anbau mit erhöhter Düngergabe im Vergleich zum traditionellen Anbausystem (zum Zeitpunkt der Maisernte) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Chagas (28 Wochen nach dem Brennen)

Bodentiefe	0-10 cm			10-20 cm		
	tradit. Anbau	+ NPK	+ Rohphosphat	tradit. Anbau	+ NPK	+ Rohphosphat
C_{org} ($g\ kg^{-1}$)	9,5	10,6 ns	10,5 ns	6,2	6,5 ns	6,3 ns
N_t ($g\ kg^{-1}$)	1,0	1,0 ns	1,1 ns	0,7	0,7 ns	0,7 ns
$P_i(NC)$ ($mg\ kg^{-1}$)	6,2	12,7 ns	37,8 ***	2,0	2,2 ns	2,5 *
$P_i(OL)$ ($mg\ kg^{-1}$)	6,8	9,3 **	6,2 ns	4,5	5,8 *	5,1 ns
P_t ($g\ kg^{-1}$)	0,018	0,022 ns	0,032 **	0,010	0,022 ns	0,010 ns
K^+ ($cmol(+) kg^{-1}$)	0,080	0,095 ns	0,073 ns	0,060	0,057 ns	0,057 ns
P_{mik} ($mg\ kg^{-1}$)	13,0	13,6 ns	11,9 ns	8,6	9,1 ns	8,6 ns
saure Phosphatase ($\mu g\ p-NP\ g^{-1}\ h^{-1}$)	929	948 ns	928 ns	1219	1260 ns	1134 ns

Signifikanzgrenzen aus paarweisem Vergleich (T-Test) des traditionellen Anbaus mit der jeweiligen Behandlung.

Kalium, das mit 30 $kg\ K_2O\ ha^{-1}$ gedüngt wurde (gegenüber 20 $kg\ ha^{-1}$ im traditionellen Anbau), zeigt sich in 0-10 cm Bodentiefe mit 0,095 $cmol(+) kg^{-1}$ nur leicht gegenüber dem traditionellen Anbau (0,080 $cmol(+) kg^{-1}$, ns) erhöht (Tabelle 41).

Gesamtstickstoff zeigt trotz einer Versechsfachung der N-Gabe (III 3.2.2) keine Erhöhung der Bodenkonzentration, was vor allem darauf zurückzuführen sein dürfte, daß die Bodenprobenahme erst zum Zeitpunkt der Maisernte erfolgte.

Die Erhöhung der NPK-Düngung hat keinen signifikanten Effekt auf die enzymatischen Aktivitäten, die mikrobielle Biomasse (C, P) und die mikrobielle Respiration. Einige biologische Parameter zeigen sich leicht erhöht, was jedoch statistisch nicht absicherbar ist.

KIRCHNER et al. (1993) fanden in North Carolina, USA, daß eine N-Düngung (140 kg ha^{-1} als Ammoniumnitrat) zu einer Erhöhung der Populationsdichte der Mikroorganismen sowie deren Aktivität führt. Für diesen Zusammenhang machen die Autoren die düngerbedingte Ertragssteigerung der Maiskultur verantwortlich, wodurch größere Mengen an Ernterückständen anfallen, die einerseits den Gehalt an organischer Substanz im Boden erhöhen und andererseits als Substrat für das mikrobielle Wachstum dienen. Im vorliegenden Fall bewirkte die erhöhte Düngergabe lediglich eine Steigerung des Maiskorn- und Maiskolbenertrages, jedoch nicht des Maisstrohgewichtes (vgl. IV 4.1). Eine erhöhte Menge an Ernterückständen fiel also im Gegensatz zu den Untersuchungen von KIRCHNER et al. (1993) nicht an, was den ausbleibenden Effekt auf die biologischen Bodenparameter erklären könnte.

BARDGETT & LEEANS (1995) berichten, daß es zu einem Rückgang des mikrobiellen Biomasse-C sowie der Dehydrogenase-Aktivität kam, nachdem die Gabe eines NPK- bzw. N-Düngers auf einer Weide (Südwestwales) zwei Jahre lang ausgesetzt wurde, wenn gleichzeitig nicht mehr gekalkt wurde. Die basale Respiration zeigte keine signifikante Reaktion.

In anderen Quellen (ILLMER & SCHINNER 1991, HAYNES 1988) wird von einem Rückgang der Aktivität der sauren Phosphatase nach P-Düngung berichtet. ILLMER & SCHINNER (1991) führen diese Depression darauf zurück, daß es sich bei der Phosphatase um ein adaptives Enzym handelt (Aktivierung durch geringe P_i -Konzentrationen, Hemmung durch hohe P_i -Konzentrationen) (vgl. IV 4.5.2).

Von besonderer Bedeutung bei der Diskussion der Ergebnisse dürfte der Zeitpunkt der Bodenprobenahme sein. Einen Effekt verschieden großer Mengen an Ernterückständen wie bei KIRCHNER et al. (1993) kann es zum Zeitpunkt der Maisernte noch nicht gegeben haben. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, daß das Maisstrohgewicht mit der unterirdischen Biomasse korreliert ist, so daß bereits während der Maiskultur ein Effekt der veränderten Wurzelmasse möglich erscheint.

4.3.2 Rohphosphat-Düngung

Die Rohphosphat-Düngung hat einen signifikanten Effekt auf die $P_i(\text{NC})$ -Konzentration im Boden: in 0-10 cm Bodentiefe ist die Konzentration mit $37,8 \text{ mg kg}^{-1}$ um mehr als das 6fache erhöht, in 10-20 cm Bodentiefe dagegen nur leicht (Tabelle 41). Unverändert bleibt die P_i -Konzentration, die mit der Olson-Methode analysiert wurde. In 0-10 cm Bodentiefe hat sich auch der Gesamt-P-Gehalt von $0,018$ auf $0,032 \text{ g kg}^{-1}$ annähernd verdoppelt.

Die biologischen Bodenparameter zeigen sich unverändert.

4.4 Durchführung einer Bodenbearbeitung

Deutlich ist der Rückgang des pH-Wertes in der Bodentiefe 0-10 cm in den mechanisch bearbeiteten Flächen der Chronosequenz *Marcelino* von pH(H₂O) 5,64 auf pH 5,43 bzw. von pH(CaCl₂) 4,83 auf pH 4,57 (Tabelle 42). Das gleiche gilt für den Versuch Chagas, in dem in den Behandlungen 5 und 6 der pH von pH(H₂O) 6,29 auf 6,07 (Behandlung 5) bzw. pH 6,03 (Behandlung 6) und von pH(CaCl₂) 5,10 auf pH 4,79 bzw. pH 4,75 signifikant zurückgeht (Tabelle 40). In 10-20 cm Bodentiefe kommt es im Gegensatz dazu zu einem signifikanten Anstieg von pH(CaCl₂) 4,18 auf pH 4,50 (Behandlung 5) bzw. pH 4,44 (Behandlung 6). Ursache ist die vertikale Verlagerung von Boden im Zuge der Bodenbearbeitung aus tiefer liegenden Schichten mit einem relativ niedrigen pH-Wert in Richtung auf die Bodenoberfläche.

Tabelle 42 Chemische und biologische Bodenparameter im Anbau mit mechanischer Bodenbearbeitung im Vergleich zum traditionellen Anbausystem (zu Beginn der Maniokernte) in der Bodentiefe 0-10 cm, Chronosequenz *Marcelino*, Signifikanzgrenzen aus paarweisem Vergleich (T-Test) (n=3 bzw. 5)

	tradit. Anbau	mechanisch bearbeitete Fläche	T-Test
pH (H ₂ O)	5,64	5,43	*
pH (CaCl ₂)	4,83	4,57	***
C _{org} (g kg ⁻¹)	11,4	12,1	ns
N _t (g kg ⁻¹)	0,86	1,02	*
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	5,4	6,5	*
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,69	1,05	***
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,032	0,110	***
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	2,20	2,05	ns
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,00	0,40	***
Phosphatase (µg p-NP g ⁻¹ h ⁻¹)	598	458	ns
Urease (µg N g ⁻¹ 2h ⁻¹)	13,1	33,1	ns
Dehydrogenase (µg INTF g ⁻¹ 2h ⁻¹)	30,6	42,8	ns

Tabelle 43 Chemische und biologische Bodenparameter im Anbau mit Stockrodung und mechanischer Bodenbearbeitung im Vergleich zum traditionellen Anbausystem (zum Zeitpunkt der Maisernte) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm, Feldversuch Chagas, 28 Wochen nach dem Brennen)

	Bodentiefe 0-10 cm				10-20 cm			
	tradit. Anbau	Stockrodung (Beh. 4)	mechan. Bodenbearbeitung (Beh. 5)	mechan. Bodenbearbeitung (Beh. 6)	tradit. Anbau	Stockrodung (Beh. 4)	mechan. Bodenbearbeitung (Beh. 5)	mechan. Bodenbearbeitung (Beh. 6)
C _{org} (g kg ⁻¹)	9,5	9,8 ns	8,8 ns	9,2 ns	6,2	6,6 ns	7,2 *	7,2 ns
pH (CaCl ₂)	5,10	5,20 ns	4,79 **	4,75 **	4,18	4,18 ns	4,50 **	4,44 *
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	6,2	6,3 ns	5,5 ns	4,5 *	2,0	2,0 ns	2,2 ns	2,3 ns
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,78	1,83 ns	1,27 **	1,13 **	0,60	0,50 ns	0,92 ns	0,85 ns
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,080	0,075 ns	0,072 ns	0,067 ns	0,060	0,058 ns	0,053 ns	0,048 ns
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	2,50	2,62 ns	1,98 *	1,87 **	0,62	0,64 ns	1,08 ns	0,88 ns
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,0	0,0 ns	0,0 ns	0,0 ns	0,23	0,27 ns	0,03 *	0,12 ns
Basensättigung (%)	59	62 ns	50 *	46 **	18	18 ns	28 ns	24 ns
Sand (%)	86	86 ns	84 ns	83 *	79	78 ns	80 ns	77 ns
Ton (%)	9,0	8,7 ns	10,2 ns	11,0 *	16	18 ns	18 ns	17 ns
basale Respiration (mg CO ₂ 100 g ⁻¹ h ⁻¹)	0,32	0,31 ns	0,30 ns	0,34 ns	0,08	0,09 ns	0,11 *	0,14 **

Signifikanzgrenzen aus paarweisem Vergleich (T-Test) des traditionellen Anbaus mit der jeweiligen Behandlung (n=7)

Gleiches wie für den pH-Wert gilt für die Calciumkonzentration in 0-10 cm Bodentiefe, die in der Chronosequenz *Marcelino* von 1,69 auf 1,05 cmol(+) kg⁻¹ (Tabelle 42) und im Versuch Chagas von 1,78 auf 1,27 (Behandlung 5) bzw. 1,13 cmol(+) kg⁻¹ (Behandlung 6) signifikant zurückgeht (Tabelle 43). Hierdurch bedingt ist auch die Abnahme der austauschbaren Kationen (von 2,50 auf 1,98 bzw. 1,87 cmol(+) kg⁻¹) und der Basensättigung (von 59 auf 50 bzw. 46 %). In der Chronosequenz *Marcelino* ist im Boden der mechanisch bearbeiteten Fläche Aluminium in Höhe von 0,40 cmol(+) kg⁻¹ nachweisbar; im Versuch Chagas kann in 0-10 cm Bodentiefe kein Aluminium nachgewiesen werden bzw. nimmt in 10-20 cm Bodentiefe von 0,23 cmol(+) kg⁻¹ auf 0,03 (Beh. 5) bzw. 0,12 cmol(+) kg⁻¹ (Behandlung 6) ab.

Weder die Stockrodung noch die mechanische Bodenbearbeitung haben einen signifikanten Effekt auf die enzymatischen Aktivitäten. Urease und β -Glucosidase gehen wie die mikrobiellen Respiration tendenziell zurück. Die mikrobielle Biomasse wurde nicht analysiert.

Der C_{org}-Gehalt verändert sich nicht signifikant. Dies deckt sich mit Untersuchungen von ALVAREZ et al. (1995), die auf schluffreichen Böden in Argentinien keinen Effekt der Bodenbearbeitung auf den C_{org}-Gehalt und das mikrobielle Biomasse-C fanden. Im Gegensatz dazu fand DORAN (1987) einen 54 %-igen Rückgang des C_{mik}-Gehaltes in gepflügten gegenüber nichtgepflügten Böden in 0-7,5 cm Bodentiefe.

DENG & TABATABAI (1996) berichten von einem signifikanten Rückgang der β -Glucosidase-Aktivität durch Pflügen (Iowa, USA). Die Bodenbearbeitung war dabei - im Gegensatz zu unseren Untersuchungen - über Jahre erfolgt.

4.5 Semipermanenter Anbau

Die semipermanenten Anbausysteme sind zeitgleich mit den jeweiligen Chronosequenzen unterschiedlich alter Bracheflächen beprobt worden (IV 2). Bei den semipermanenten Anbausystemen handelt es sich bei der zeitgleich mit der Chronosequenz *Gonzaga* beprobten Fläche um eine Maracujá-Plantage, bei *Lucas* um eine aufgegebene Papaya-Plantage und bei *Marcelino* um eine Pfefferplantage (siehe auch III 3.1 und Anhang 1). Alle Flächen des traditionellen Anbaus befanden sich im Stadium der Maniokernte.

4.5.1 Veränderung chemischer Bodenparameter im semipermanenten Anbau

Mit dem Übergang vom traditionellen zum semipermanenten Anbau ist ein Rückgang des pH-Wertes in 0-10 cm Bodentiefe um durchschnittlich 0,5 pH-Einheiten verbunden (Tabelle 44).

Der Rückgang in 10-20 cm Bodentiefe ist mit ca. 0,25 pH-Einheiten geringer und nicht durchweg signifikant.

Eine signifikante Erhöhung der Al^{3+} -Konzentration im semipermanenten Anbau (von 0,0 auf 0,42 cmol(+) kg⁻¹) konnte lediglich in der Pfefferfläche (*Marcelino*) nachgewiesen werden (Tabelle 45). In der Maracujá- (*Gonzaga*) und der Papaya-Plantage (*Lucas*) war die Al^{3+} -Konzentration gleich Null. Primäre Ursache, warum in der Pfefferfläche Aluminium nachgewiesen wurden, ist die abweichende Analyseverfahren (IBW, vgl. III 4.1.3). Daß in der Maracujá-Fläche kein Al^{3+} nachgewiesen werden konnte hängt mit dem relativ hohen pH-Niveau von pH(CaCl₂) 4,41 bzw. pH(H₂O) 5,57 zusammen (vgl. Chronosequenz *Cumarú*). Dagegen ist nicht zu erklären, warum in der Papaya-Fläche kein Aluminium gefunden wurde.

Tabelle 44 Der pH-Wert im semipermanenten Anbau im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem mit Brennen (zum Zeitpunkt der Maniokernte), Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm (T-Test)

	Bodentiefe 0-10 cm			10-20 cm		
	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (pH)	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (pH)
pH(CaCl₂)						
Pfeffer	4,83	4,30 ***	-0,53	4,45	4,18 *	-0,27
Maracujá	4,93	4,41 ***	-0,52	4,07	4,12 ns	
Papaya	4,51	4,17 **	-0,34	4,17	4,01 ns	
pH(H₂O)						
Pfeffer	5,64	5,20 **	-0,44	5,32	5,07 *	-0,25
Maracujá	6,06	5,57 ***	-0,49	5,26	5,31 ns	
Papaya	5,73	5,20 ***	-0,53	5,25	5,01 *	-0,24

In den Maracujá- und Papaya-Flächen kommt es in 0-10 cm Bodentiefe zu einem signifikanten Rückgang des C_{org}-Gehaltes um 37 bzw. 28 % (Tabelle 45). In der Pfefferfläche bleibt der C_{org}-Gehalt dagegen unverändert. Eine mögliche Ursache ist der Umstand, daß die Pfefferplantage (*Piper nigrum*, Chronosequenz *Marcelino*) in der Nähe des Wohnhauses der Familie Francisco liegt. Das von der Familie gehaltene Geflügel (Hühner, Truthähne) hielt sich zeitweise zwischen den Pfefferpflanzen auf, wodurch es zweifelsohne zu einem Eintrag

von Kot gekommen ist. Ferner ist anzumerken, daß die Entfernung zwischen dem Maniokfeld (auf dem Land des Sr. Marcelino) und der Pfefferfläche relativ groß war (ca. 400 m), so daß die Bedingungen für die Einrichtung einer "falschen Zeitreihe", wie sie in Kapitel III postuliert wurden, nicht optimal waren. Dieser These widerspricht nicht zwingend, daß der C_{org} -Gehalt in 10-20 cm Bodentiefe der Pfefferfläche signifikant geringer ist als im traditionellen Anbau (Tabelle 45), da der Eintrag von Geflügelkot sicherlich einen deutlich geringeren Effekt auf die Bodentiefe 10-20 cm hatte als auf die Bodentiefe 0-10 cm.

MARTINS et al. (1990a) fanden bei Untersuchungen in Ost-Amazonien (Capitão Poço, Pará), daß der C_{org} -Gehalt einer Fläche, die 5 Jahre lang mit Reis, Mais und Bohnen (*Vigna unguiculata*) bewirtschaftet wurde, um 28 % geringer war als im Primärwald (0-15 cm Bodentiefe), in 0-10 cm Bodentiefe (MARTINS et al. 1990b) betrug der Rückgang 35 %, in 10-20 cm 11 %. Ob die Unterschiede signifikant sind, wird nicht gesagt.

Die P_i -Konzentration ist in der Pfefferfläche (*Marcelino*; ns) und der Papaya-Plantage (*Lucas*) in beiden Bodentiefen gegenüber dem traditionellen Anbau erhöht (Tabelle 45). Die primäre Ursache dürfte eine u.U. langjährige Düngung der Plantagenkultur sein. Die P_i -Konzentrationen in der Maracujá-Fläche (*Gonzaga*) unterscheiden sich dagegen nicht. Für eine Erklärung dieses Sachverhaltes fehlen Informationen über die Nutzungsgeschichte der Plantagen.

Die Gehalte an Calcium und Magnesium sind durchweg in allen Flächen des semi-permanenten Anbaus in der Bodentiefe 0-10 cm signifikant verringert - in der Pfefferfläche und der Papaya-Plantage halbiert sich ihre Konzentration nahezu. Dasselbe gilt für die Bodentiefe 10-20 cm, die jedoch lediglich in der Chronosequenz *Marcelino* analysiert wurde (Tabelle 45).

Kalium zeigt widersprüchliche Tendenzen. So ist die K-Konzentration in der Maracujá-Plantage in beiden Bodentiefen signifikant niedriger als im traditionellen Anbau (Tabelle 45). Das gleiche gilt in der Papaya-Plantage (*Lucas*) für die Bodentiefe 0-10 cm (ns), in 10-20 cm Bodentiefe ist die K-Konzentration dagegen signifikant erhöht. Möglich ist eine Kaliumauswaschung aus der oberen in die darunterliegende Bodenschicht (vgl. IV 3.1). Ob diese nun durch eine Konzentrationserhöhung in 10-20 cm Bodentiefe belegt werden kann, hängt u.a. vom Zeitpunkt der Bodenprobenahme bzw. des Kaliumeintrages (z.B. durch Düngung oder Asche) ab. Ob und in welchem Ausmaß es zu einer K-Auswaschung kommt hängt nicht zuletzt vom Sorptionsvermögen des Bodens und hier insbesondere der Bodenschicht 0-10 cm ab. Eine wichtige Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang auch der Vegetationsdecke und der damit verbundenen Durchwurzelung des Bodens zu. Diese war dem Anschein nach in

allen Plantagenflächen gering, was der Kaliumversickerung Vorschub geleistet haben könnte. HÖLSCHER (1995) fand in zwei gebrannten traditionellen Anbauflächen Kaliumaustragsraten (gemessen in 105 cm Bodentiefe) von 2,6 bzw. 5,3 kg⁻¹ ha⁻¹ a⁻¹.

Tabelle 45 Chemische Bodenparameter im semipermanenten Anbau im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem mit Brennen (zum Zeitpunkt der Maniokernte), Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm.

	Bodentiefe 0-10 cm			10-20 cm		
	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (%)	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (%)
C_{org} (g kg⁻¹)						
Pfeffer	11,4	11,5 ns		9,0	6,2 *	-31
Maracujá	12,0	7,6 **	-37	5,4	5,3 ns	
Papaya	11,1	8,0 ***	-28	7,4	6,1 **	-18
P_i (mg kg⁻¹)						
Pfeffer	5,4	7,3 ns	(+35)	4,9	6,1 ns	
Maracujá	5,1	5,4 ns		2,0	2,1 ns	
Papaya	3,0	9,3 **	+210	1,4	3,3 *	+136
Ca + Mg (cmol(+) kg⁻¹)						
Pfeffer	1,96	1,01 ***	-48	1,11	0,70 *	-37
Maracujá	1,36	0,71 ***	-48	-	-	
Papaya	0,83	0,70 *	-16	-	-	
K (cmol(+) kg⁻¹)						
Pfeffer	0,032	0,041 ns	(+28)	0,021	0,023 ns	
Maracujá	0,053	0,034 ***	-36	0,034	0,020 ***	-41
Papaya	0,046	0,039 ns	(-15)	0,029	0,039 *	+34
Al (cmol(+) kg⁻¹)						
Pfeffer	0,0	0,42 ***		4,1	5,9 ns	

4.5.2 Veränderung biologischer Bodenparameter im semipermanenten Anbau

In allen semipermanenten Anbausystemen sind die enzymatischen Aktivitäten gegenüber dem traditionellen Anbau teils drastisch reduziert (Tabelle 46). Die Depression der sauren Phosphatase beläuft sich in 0-10 cm Bodentiefe auf 31-76 %, in 10-20 cm auf 43 bzw. 58 %. Der Rückgang der Urease-Aktivität beträgt 16-34 bzw. 33-43 %. Die Aktivität der β -Glucosidase ist um 38 bzw. 51 % reduziert, die der Dehydrogenase um 28 % (Pfefferfläche; ns). Die durchschnittliche Depression der drei enzymatischen Aktivitäten beträgt in 0-10 cm Bodentiefe in der Maracujá-Fläche (*Gonzaga*) 33 % , in der Papaya-Fläche (*Lucas*) 49 %, in der Bodentiefe 10-20 cm 42 bzw. 49 %.

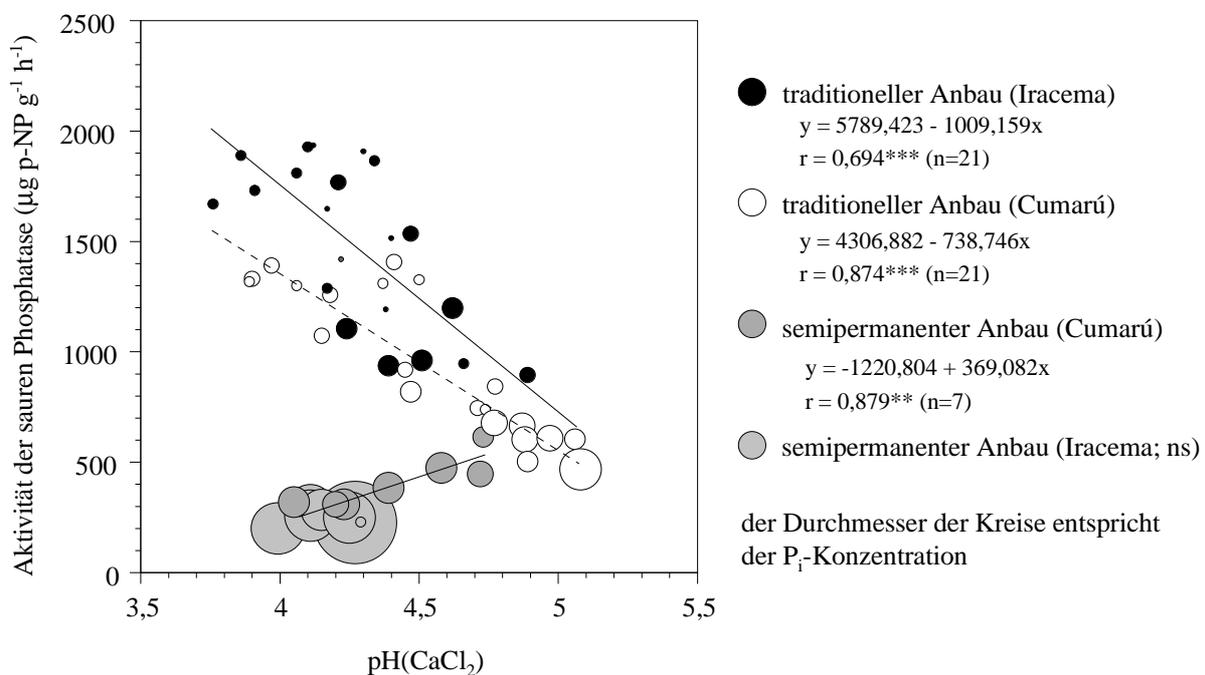


Abbildung 21 Abhängigkeit der Aktivität der sauren Phosphatase und der P_i -Konzentration vom $pH(CaCl_2)$ -Wert des Bodens (0-10 cm Bodentiefe) in den traditionellen und den semipermanenten Anbausystemen der Standorte Cumarú und Iracema.

Anmerkung: der Durchmesser der Kreise entspricht der P_i -Konzentration

Auffällig ist, daß der in Kapitel IV 3.2.1 beschriebene Zusammenhang einer negativen Korrelation zwischen der Phosphatase-Aktivität und dem pH des Bodens beim Übergang vom traditionellen zum semipermanenten Anbau nicht mehr gültig ist: bei abnehmendem pH im semipermanenten Anbau nimmt tendenziell auch die Phosphatase-Aktivität ab, wie Abbildung 21 verdeutlicht. Dieser Zusammenhang kann für die Maracujá-Fläche in Cumarú (*Gonzaga*) statistisch belegt werden. Das Ergebnis der Berechnung einer multiplen Regression macht deutlich (Tabelle 47), daß die im semipermanenten Anbau auftretende hohe P_i -Konzentration

und der geringe C_{org} -Gehalt die Ursache für die niedrige Phosphatase-Aktivität sind. Die P_i -Konzentration (in Abbildung 21 entspricht sie dem Durchmesser der Kreise) liegt im semipermanenten Anbau im Durchschnitt in Iracema mit $9,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ($2\text{-}16 \text{ mg kg}^{-1}$) und in Cumarú mit $5,4 \text{ mg kg}^{-1}$ ($4\text{-}6$) deutlich höher als im traditionellen Anbau (Mittel in Iracema $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ($1\text{-}4$), in Cumarú $3,6 \text{ mg kg}^{-1}$ ($2\text{-}8$)).

Tabelle 46 Enzymatische Aktivitäten im semipermanenten Anbau im Vergleich mit dem traditionellen Anbausystem mit Brennen (zum Zeitpunkt der Maniokernte) in den Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm (T-Test).

	Bodentiefe 0-10 cm			10-20 cm		
	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (%)	tradit. Anbau	semi-permanenter Anbau	Differenz (%)
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Pfeffer	598	271 *	-55	-	-	
Maracujá	590	408 **	-31	911	517 ***	-43
Papaya	1026	249 ***	-76	1331	557 ***	-58
Urease ($\mu\text{g N g}^{-1} \text{ 2h}^{-1}$)						
Pfeffer	13,1	8,7 ns	(-34)	-	-	
Maracujá	30,3	25,4 ns	(-16)	20,7	13,9 ***	-33
Papaya	29,6	19,9 ***	-33	22,1	12,7 **	-43
Dehydrogenase ($\mu\text{g INTF g}^{-1} \text{ 2h}^{-1}$)						
Pfeffer	30,6	22,0 ns	(-28)	-	-	
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Maracujá	32,2	15,9 ***	-51	11,0	5,6 *	-49
Papaya	20,5	12,7 **	-38	10,1	5,6 ns	(-45)

Tabelle 47 Zusammenfassung einer multiplen Regression für die Aktivität der sauren Phosphatase als abhängige Variable im traditionellen (Zeitpunkt der Maniokernte) und im semipermanenten Anbau. Chronosequenzen *Gonzaga* und *Lucas*, Bodentiefe 0-10 cm.

	partieller Regressions- koeffizient (β)	Standard- fehler (β)	B	Standard- fehler B	t(23)	Signifikanz- niveau
Interzept			5,5	1175	0,005	0,996
P _i	-0,463	0,165	-45,4	16	-2,808	0,010
C _{org}	0,501	0,184	638,1	235	2,717	0,012
aK	-0,268	0,309	-246,4	284	-0,868	0,394
pH(CaCl ₂)	0,103	0,317	97,6	300	0,326	0,747

R= 0,7556 R²= 0,571 korrigiertes R²= 0,496
F(4,23)=7,6517 (p < 0,00045) Standardfehler: 220,14

4.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der modifizierten Anbausysteme

Der Verzicht auf das Brennen hat einen nachhaltigen Effekt auf die chemischen und biologischen Bodencharakteristika. Stark verändert zeigen sich die Bodenazidität, die Konzentration basischer Kationen sowie die Phosphordynamik.

Inwieweit diese Veränderungen ertragsrelevant sind, hängt von den Ausgangsbedingungen ab. Bei einem niedrigen pH-Niveau und geringen Calcium-, Kalium- und Phosphorgehalten kann der Verzicht auf das Brennen Aluminiumtoxizität sowie einen elementaren Nährstoffmangel nach sich ziehen. Darüber hinaus kann es zu einer Nährstoff-Immobilisierung kommen - hier nachgewiesen für Phosphor - ausgelöst durch die großen Mengen und das weite C:P-Verhältnis des organischen Materials. So gesehen kann das Anbausystem ohne Brennen nicht generell als die Alternative zum traditionellen Anbau bewertet werden.

Der Effekt einer Integration von *Vigna unguiculata* beruht in erster Linie auf der zusätzlich gegebenen Düngergabe (Erhöhung der P- und K-Konzentration im Boden).

Die Integration von *Canavalia ensiformis* als Bodendecker hat in Cumarú eine Erhöhung der C_{org}- und N_t-Gehalte zur Folge. Die Kalium-Konzentration nimmt - verursacht durch die Aufnahme des Bodendeckers - ab. Deutlich wird hierbei, daß ein Effekt von einer guten Phyto-masseentwicklung des Bodendeckers abhängt. Dieser bleibt aus, wenn, wie in Iracema, das Wachstum des Bodendeckers schlecht war.

Sowohl die Erhöhung der NPK-Düngung als auch die P-Gabe in Form von Rohphosphat hat eine Erhöhung der P-Konzentration im Boden zur Folge (zum Zeitpunkt der Maisernte).

Die durch eine mechanische Bodenbearbeitung bedingten Veränderungen beruhen in erster Linie darauf, daß es zu einer vertikalen Vermischung der Bodenschichten kommt. Dies äußert sich in einer Abnahme des pH-Wertes in 0-10 cm Bodentiefe und in einer pH-Erhöhung in 10-20 cm. Zudem nimmt der Sandanteil in 0-10 cm ab, der Tonanteil zu. Der Gehalt an austauschbaren Kationen wird in 0-10 cm Bodentiefe geringer, wovon vor allem Calcium betroffen ist. Die enzymatischen Aktivitäten sind nicht signifikant verändert.

Im semipermanenten Anbausystem (ca. 6 Jahre alt) kommt es gegenüber dem traditionellen Anbau zu nachhaltigen Veränderungen bodenchemischer und -biologischer Charakteristika: (a) Rückgang des pH-Niveaus um ca. 0,5 pH-Einheiten in 0-10 cm und um ca. 0,25 pH-Einheiten in 10-20 cm Bodentiefe, (b) Abnahme des C_{org} -Gehaltes, (c) deutlicher Rückgang des Calcium und Magnesium-Gehaltes (Ca+Mg), (d) Abnahme der enzymatischen Aktivitäten, (e) Tendenz zu einer höheren P_i -Konzentration als Folge eines erhöhten Düngungsniveaus, (f) evtl. Anstieg der Al^{3+} -Konzentration.

5 Beziehung zwischen den Bodendaten und der landwirtschaftlichen Produktivität

Nach der Betrachtung rein bodenkundlicher Fragestellungen soll in diesem Kapitel der Bezug zur landwirtschaftlichen Produktivität der Versuchsstandorte und der einzelnen Anbausysteme hergestellt werden. Verrechnet wurden fast ausschließlich Bodendaten aus der Bodentiefe 0-10 cm. Die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel sowie weiterer statistische Analysen haben gezeigt, daß die Varianz der Bodenparameter in 10-20 cm Bodentiefe so gering ist, daß kein enger Zusammenhang mit den Ertragsdaten nachgewiesen werden kann.

Als ergänzende Information und als Maß für den Zusammenhang zwischen den jeweiligen Boden- und Ertragsdaten werden die Korrelationskoeffizienten genannt. Hintergrund ist, daß geprüft werden soll, ob einzelne Parameter als Indikatoren für das Ertragspotential der untersuchten Böden geeignet sind. Hierbei spielt es keine Rolle, ob eine eventuelle Abhängigkeit von anderen Bodenparametern vorliegt.

Bei den hier durchgeführten Faktorenanalysen wurde die Faktorenanzahl mit Hilfe des sog. Kaiser-Kriterium (s. III 7.1) bestimmt. Die zwei Faktoren mit den höchsten Eigenwerten werden grafisch dargestellt. Durch diese Maßnahme wird bewußt auf die Erklärung eines Teils der vorhandenen Varianz verzichtet, und zwar zugunsten einer besseren Verständlichkeit der Analyseergebnisse.

5.1 Ursachen für die unterschiedlich hohe landwirtschaftliche Produktivität im traditionellen Anbau der Standorte Cumarú, Iracema und Chagas

Das methodische Vorgehen bei der statistischen Auswertung besteht darin, Datenpools (hier = Behandlungen) einander gegenüberzustellen, die sie sich hinsichtlich der Kulturpflanzen-erträge unterscheiden. Die so erzeugte Variabilität wird als Effekt der einbezogenen Behandlungen interpretiert. Prämisse: die auftretende Variabilität ist vorrangig durch die Unterschiedlichkeit der Behandlungen bedingt.

5.1.1 Ursachen für die unterschiedlich hohen Mais- und Maniokerträge

Ein Vergleich der Produktivität der Standorte wird dadurch möglich, daß in allen drei Feldversuchen der traditionelle Anbau als Behandlung enthalten ist, und zum gleichen Zeitpunkt, der Maisernte, beprobt wurde (Behandlung 2 in Cumarú und Iracema bzw. Behandlung 1 im Versuch Chagas).

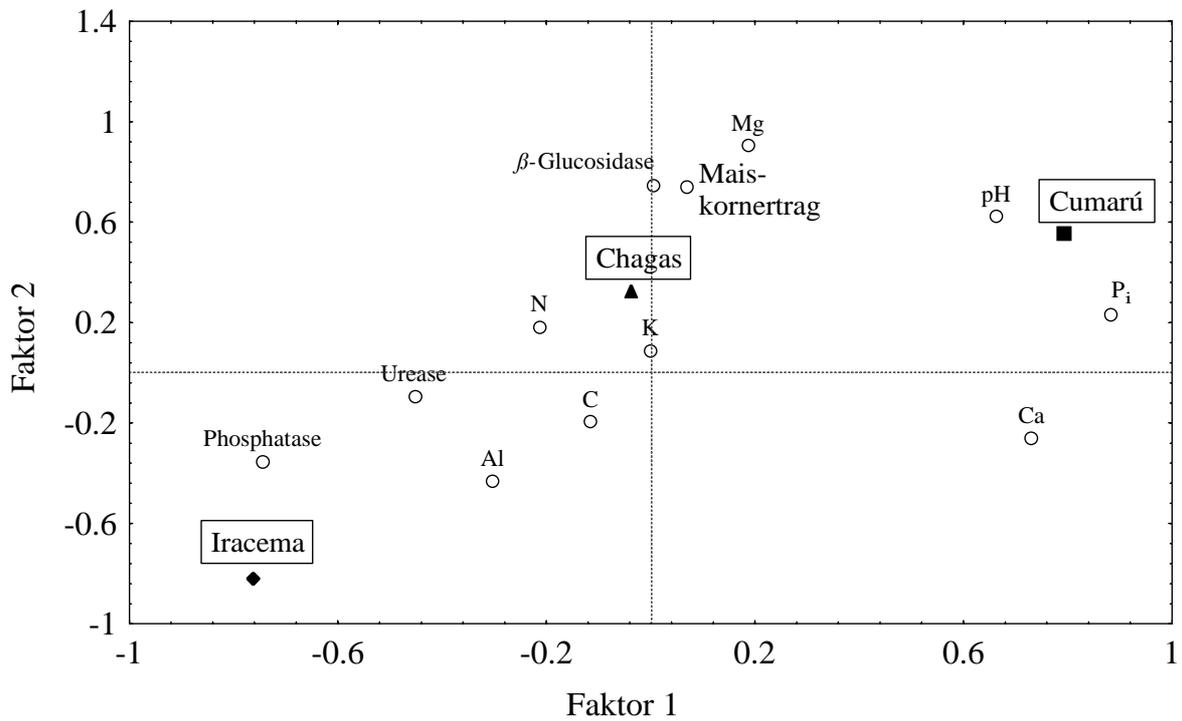
Abbildung 22 a,b zeigt das Resultat zweier Faktorenanalysen, bei der Bodendaten vom Zeitpunkt der Maisernte mit (a) den Mais Korn- und (b) den Maniokknollenerträgen der Standorte Cumarú, Iracema und Chagas verrechnet wurden. In der Faktorenanalyse (a) wird Faktor 1 dominiert von der P_i - und der Ca-Konzentration, dem pH und der Phosphatase-Aktivität (Tabelle 48). Faktor 2 wird dominiert von der Mg-Konzentration, der β -Glucosidase-Aktivität, dem pH sowie dem Mais Korn ertrag. Die Faktorwerte der Standorte (Tabelle 49) Cumarú und Chagas (0,552 bzw. 0,319) unterscheiden sich hinsichtlich Faktor 2 nur unwesentlich, gegenüber Iracema (-0,825) jedoch deutlich, was dem unterschiedlichen Maisertragsniveau entspricht.

Der Mais Korn ertrag weist eine enge positive Beziehung zum Magnesium-Gehalt des Bodens auf. Dieser Zusammenhang ist jedoch ganz anders zu interpretieren als beim Maniok, da der Mais, als die Bodenproben gezogen wurden, praktisch erntereif war. Der Mg-Gehalt hatte folglich keine Bedeutung mehr für dessen Entwicklung. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die enge Beziehung der Mg-Konzentration zum Mais Korn ertrag den Entzug der konkurrierenden Kationen Calcium und Kalium widerspiegelt, die bevorzugt aufgenommen wurden und entscheidend zu einer Ertragssteigerung geführt haben. Die nicht vorhandene negative Korrelation dieser Kationen mit dem Mais Korn ertrag läßt jedoch in diesem Fall nicht den Schluß zu, daß der Mais ausreichend versorgt war, so daß es zu keiner deutlichen Abnahme der Bodenkonzentration gekommen ist. Das Fehlen eines negativen Zusammenhanges deutet lediglich darauf hin, daß zwischen den drei Standorten kein Gradient des Calcium- bzw. Kalium-Entzuges vorhanden ist.

Ob die in Cumarú ermittelte enge Beziehung des Mais Korn ertrages zum Gesamt-N-Gehalt eine Rolle für die unterschiedliche Produktivität der Standorte spielt, kann im Grunde nicht beantwortet werden, da bei der vorliegenden Analyse Bodendaten der Probenahme zum Zeitpunkt der Maisernte verrechnet wurden. Das gleiche gilt für die P_i -Konzentration.

Eine negative Korrelation mit dem Mais Korn ertrag weist die Al-Konzentration auf.

(a)



(b)

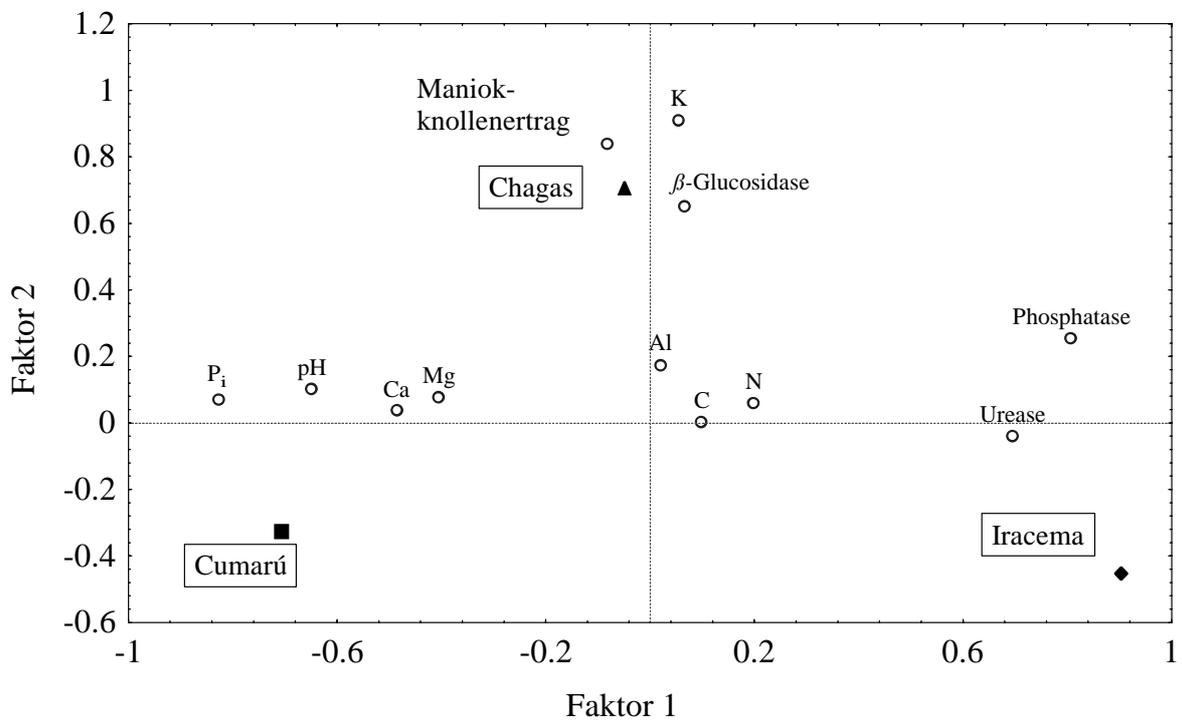


Abbildung 22 a,b Faktorenladungen einer Hauptkomponentenanalyse (a) der Maiskorn- und (b) der Maniokknollenerträge sowie relevanter Bodendaten (0-10 cm Bodentiefe) zum Zeitpunkt der Maisernte an den Standorten Cumarú, Iracema und Chagas

Tabelle 48 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich der Produktivität der Standorte Cumarú, Iracema und Chagas (Bodentiefe 0-10 cm)

	Mais				Maniok			
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Maiskornertrag	0,068	0,741	-0,397	0,199	-	-	-	-
Maniok- knollenertrag	-	-	-	-	-0,083	0,838	0,091	0,035
pH(CaCl ₂)	0,662	0,624	-0,254	0,009	-0,649	0,101	-0,174	0,640
P _i	0,881	0,232	0,005	0,087	-0,828	0,070	-0,123	0,160
C _{org}	-0,116	-0,194	0,799	0,033	0,099	0,002	0,781	-0,228
N	-0,214	0,186	0,811	0,001	0,199	0,059	0,775	0,105
Ca	0,729	-0,261	-0,285	0,194	-0,486	0,037	-0,585	0,107
Mg	0,186	0,907	0,206	-0,134	-0,406	0,078	0,476	0,654
K	-0,001	0,091	0,013	0,932	0,055	0,910	-0,074	-0,068
Al	-0,305	-0,430	0,457	-0,026	0,020	0,174	0,347	-0,773
s. Phosphatase	-0,745	-0,351	0,238	0,349	0,806	0,253	0,207	-0,332
Urease	-0,453	-0,093	0,329	0,215	0,695	-0,039	0,113	0,169
β -Glucosidase	0,004	0,747	0,012	0,574	0,065	0,649	0,098	0,715
Eigenwert	2,697	2,838	2,017	1,471	2,702	2,073	2,026	2,192
Wahrscheinlichkeit	0,225	0,237	0,168	0,123	0,225	0,173	0,169	0,183

Tabelle 49 Faktorwerte (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich der Produktivität der Standorte Cumarú, Iracema und Chagas (Bodentiefe 0-10 cm)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Mais				
Cumarú	0,793	0,552	0,348	-0,360
Iracema	-0,762	-0,825	0,361	-0,290
Chagas	-0,036	0,319	-0,827	0,758
Maniok				
Cumarú	-0,520	-0,379	0,134	0,295
Iracema	0,556	-0,203	0,264	-0,355
Chagas	0,042	0,761	-0,917	0,732

In auffallend enger Beziehung zu beiden Ertragsgrößen steht die Aktivität der β -Glucosidase. Sie ist es auch, die als einziger Bodenparameter den Anstieg der landwirtschaftlichen Produktivität in der Reihenfolge Iracema - Cumarú - Chagas widerspiegelt. Ihre Aktivität liegt am Standort Chagas im Mittel bei $22,0 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (7,8-24,2), in Cumarú bei 20,0 (18,6-21,4) und in Iracema bei $16,0 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ (12,2-22,2). Die Durchführung einer Korrelationsanalyse belegt den signifikanten Zusammenhang zwischen der β -Glucosidase-Aktivität einerseits und dem Maiskorn- und Maiskolbenenertrag andererseits (Abbildung 23). Der Maiskolbenenertrag wird hierbei zusätzlich präsentiert, da er eine Art echte Wiederholung des Kornertrages darstellt - beide wurden unabhängig voneinander erhoben (s. III 5). Die Korrelation zwischen der β -Glucosidase-Aktivität und dem Maniokknollenertrag ist nicht statistisch absicherbar.

Doch wie erklärt sich die Beziehung zwischen den Maisertragsparametern und der β -Glucosidase-Aktivität? Der Mais war zum Zeitpunkt der Bodenprobenahme praktisch erntereif, folglich hatte sein Wachstum einen Einfluß auf das Resultat der Bodenanalyse. Dort wo hohe Erträge erzielt wurden, wurden relativ große Mengen an ober- und unterirdischer Phytomasse gebildet. Es ist sehr wahrscheinlich, daß insbesondere die verstärkt gebildete Wurzelmasse - im Moment der Bodenprobenahme bereits im Absterben begriffen - einen Effekt auf die Aktivität der β -Glucosidase hatte. Es kann in diesem Fall also nicht die Rede davon sein, daß die β -Glucosidase-Aktivität ein Indikator für den Maisertrag sein könnte. Es ist vielmehr so, daß sich die Maiserträge in unterschiedlich hohen Aktivitäten der β -Glucosidase widerspiegeln.

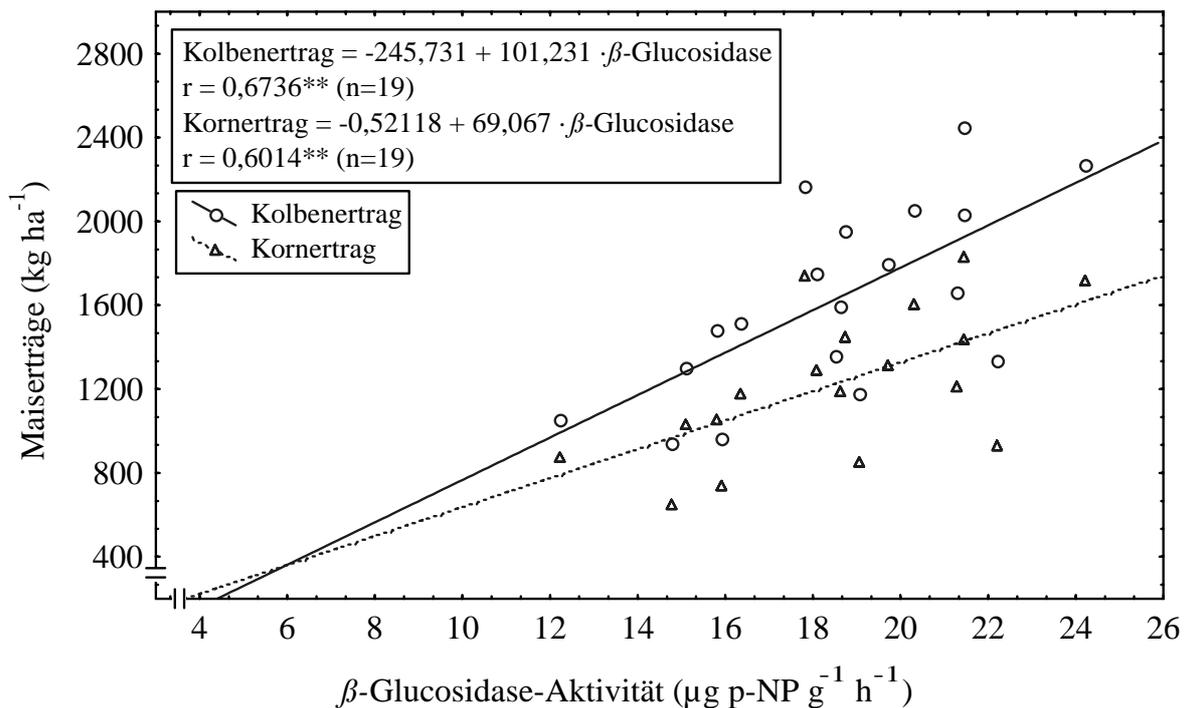


Abbildung 23 Zusammenhang zwischen der β -Glucosidase-Aktivität und dem Maiskorn- bzw. Maiskolbenertrag an den drei Standorten Chagas, Cumarú und Iracema (Bodentiefe 0-10 cm)

Will man also Ursache und Wirkung korrekt darstellen, müßten genau genommen die Achsen in Abbildung 23 vertauscht werden.

In Abbildung 22b wird auch deutlich, daß der Maniokknollenertrag positiv mit der Kalium-Konzentration des Bodens korreliert ist. Dies erklärt den hohen Ertrag am Standort Chagas, der mit $0,08 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ einen höheren K-Gehalt in 0-10 cm Bodentiefe gegenüber Cumarú und Iracema aufweist (jeweils $0,06 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). Zum Zeitpunkt der Bodenprobenahme befand sich der Maniok im vollen vegetativen Wachstum, die Anbauperiode dauerte noch weitere 9 Monate. So gesehen hatte die Kalium-Konzentration zu diesem Zeitpunkt eine große Relevanz für die weitere Entwicklung der Maniokkultur.

Nach Angaben vom HOWELER (1981) sind die Kaliumgehalte in einjährigen Maniokknollen mit 1,14 % ausgesprochen hoch (z.B. Calcium 0,16 %). Grund ist die Funktion des Kaliums bei der Phloembeladung für den Stärketransport in die Wurzeln.

5.1.2 Ursachen für die höheren Bohnenerträge in Cumarú gegenüber Iracema

Vigna wurde unmittelbar nach der Maisernte gesät, so daß die zu diesem Zeitpunkt ermittelten Bodendaten die Ausgangsbedingungen für die Bohnenkultur darstellen. Da die Aluminiumkonzentration eine wichtige Rolle spielen könnte, in 0-10 cm Bodentiefe jedoch keinerlei Varianz zeigt, wurde zusätzlich eine Faktorenanalyse der Daten aus der Bodentiefe 10-20 cm durchgeführt.

Entscheidend für die unterschiedliche Entwicklung von *Vigna* an den beiden Standorten dürfte nach den Ergebnissen der Faktorenanalyse in 0-10 cm Bodentiefe (Abbildung 24 a, Tabelle 50) der pH-Wert ($r = 0,9018^{***}$; $n=14$) und die P_i -Konzentration ($r = 0,7330^{**}$) sein. Darüber hinaus sind die Urease-Aktivität ($r = -0,8240^{***}$), die Aktivität der sauren Phosphatase ($r = -0,8209^{***}$) sowie die H^+ -Konzentration ($r = -0,8188^{***}$) für den Bohnenertrag von Bedeutung.

Die Bodenreaktion ist in Cumarú mit pH 5,20 gegenüber pH 4,65 in Iracema deutlich höher (Tabelle 52). Das äußert sich auch in einer unterschiedlichen Kationenbelegung: Calcium ist in Cumarú mit 1,89 gegenüber 1,46 $cmol(+) kg^{-1}$ in Iracema erhöht, H^+ mit 1,83 gegenüber 2,73 $cmol(+) kg^{-1}$ verringert. Damit unterscheidet sich auch die Basensättigung. Sie beträgt in Cumarú 59 %, in Iracema 43 %. Dieser Zusammenhang ist in 10-20 cm Bodentiefe in nur sehr abgeschwächter Form zu beobachten. Die Konzentration an Calcium und Magnesium beträgt in Cumarú 0,53, in Iracema 0,36 $cmol(+) kg^{-1}$. Die pH-Werte unterscheiden sich nicht.

Aluminium ist in 0-10 cm Bodentiefe weder in Cumarú noch in Iracema nachweisbar (daher nicht in die Berechnung einbezogen). In 10-20 cm Bodentiefe ist dagegen die Konzentration in Iracema mit 0,74 gegenüber 0,31 $cmol(+) kg^{-1}$ in Cumarú signifikant erhöht. Die Faktorenanalyse der Daten in 10-20 cm Bodentiefe (Abbildung 24 b, Tabelle 50) belegt den negativen Effekt der erhöhten Aluminiumkonzentration auf den Bohnenertrag in Iracema (Al mit negativer, der Bohnenertrag mit positiver Faktorladung auf Faktor 1 bzw. positive Korrelation zwischen Al und dem Standort Iracema).

Neben diesem pH-bedingten negativen Effekt auf den Bohnenertrag in Iracema, spielt die P_i -Konzentration eine wichtige Rolle. Sie ist in Cumarú mit 7,4 gegenüber 4,0 $mg kg^{-1}$ in Iracema signifikant erhöht, hat folglich einen positiven Effekt auf den Bohnenertrag. Dieser Zusammenhang wird durch das Ergebnis der Faktorenanalyse der Daten aus 10-20 cm Bodentiefe bestätigt (Abbildung 24 b, Tabelle 50). Die P_i -Konzentration beträgt in Cumarú 3,6, in Iracema 2,0 $mg kg^{-1}$ (Tabelle 52).

Die negative Korrelation der Phosphatase-Aktivität in 0-10 cm Bodentiefe mit dem Bohnenertrag bestätigt sich in der Faktorenanalyse der Daten aus der Bodentiefe 10-20 cm. Entscheidend dürfte hier einerseits dessen Beziehung zum pH und andererseits zur P_i -Konzentration im Boden sein (vgl. Abb. 15).

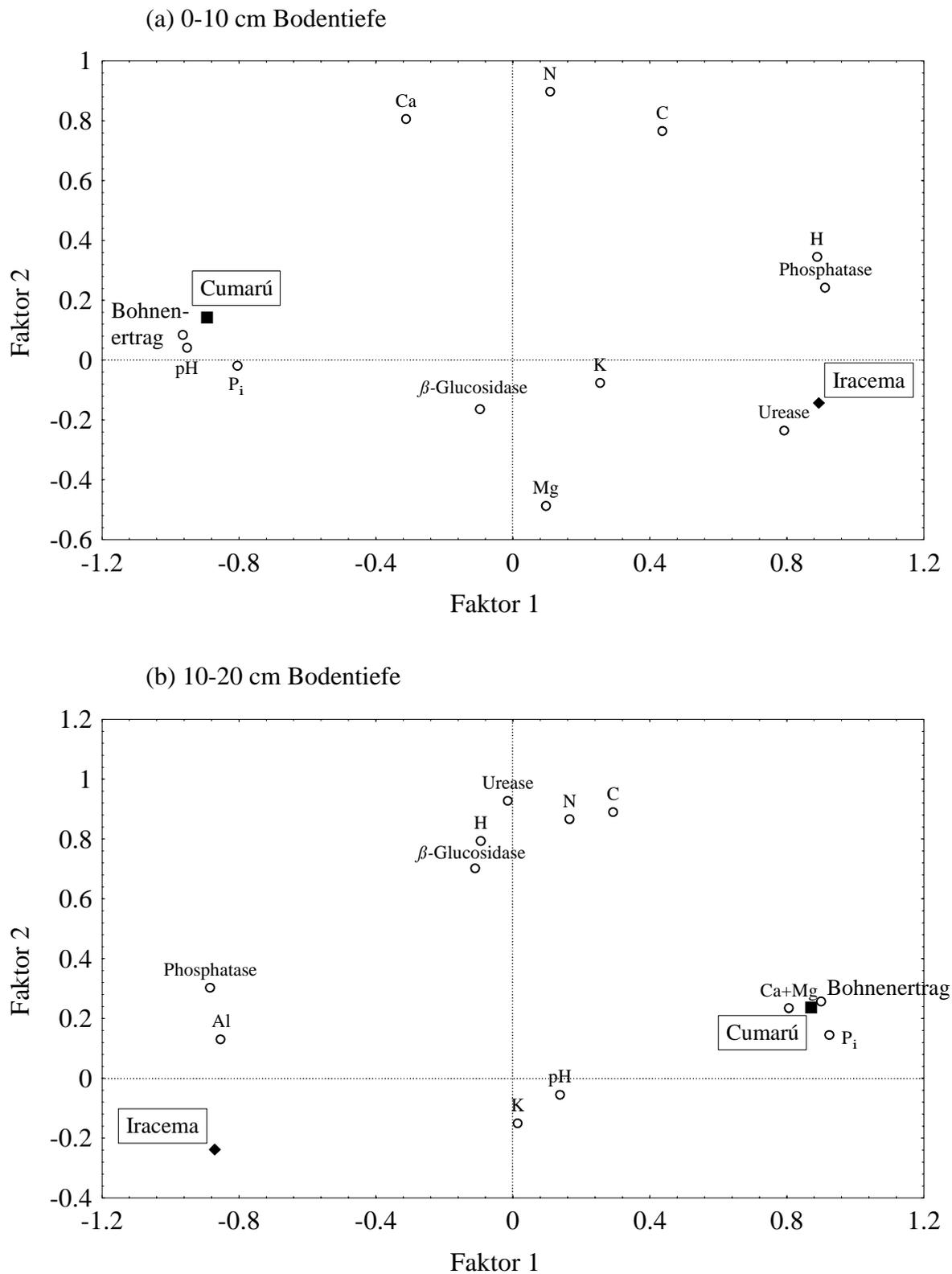


Abbildung 24 a,b Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm (a) und 10-20 cm (b) Bodentiefe) und dem Bohnenkornenertrag im Anbau mit *Vigna unguiculata* in Cumarú und Iracema zum Zeitpunkt der Bohnensaat

Tabelle 50 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich der Bohnenerträge (*Vigna unguiculata*) in Cumarú und Iracema (Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm)

	Bodentiefe 0-10 cm			10-20 cm			
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Bohnerertrag	-0,963	0,084	-0,063	0,901	0,256	0,020	-0,081
pH(CaCl ₂)	-0,950	0,041	0,137	0,138	-0,055	0,953	0,010
P _i	-0,804	-0,019	0,485	0,924	0,144	-0,092	0,078
C _{org}	0,437	0,765	0,200	0,293	0,890	-0,083	0,039
N _t	0,109	0,898	0,114	0,166	0,866	-0,182	-0,312
Ca	-0,312	0,805	-0,112	-	-	-	-
Mg	0,097	-0,488	0,650	-	-	-	-
Ca+Mg	-	-	-	0,807	0,234	0,127	0,229
K	0,255	-0,076	-0,621	0,015	-0,150	-0,013	-0,948
Al	-	-	-	-0,853	0,130	-0,341	0,186
H	0,888	0,345	0,108	-0,093	0,793	0,109	0,393
saure Phosphatase	0,912	0,243	-0,195	-0,885	0,302	0,087	0,170
Urease	0,793	-0,235	0,191	-0,014	0,928	0,003	0,253
β -Glucosidase	-0,096	-0,163	-0,688	-0,109	0,702	0,529	0,118
Eigenwert	5,110	2,553	1,692	3,981	3,800	1,388	1,359
Wahrscheinlichkeit	0,426	0,213	0,141	0,332	0,317	0,116	0,113

Tabelle 51 Faktorwerte (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich der Bohnenerträge (*Vigna unguiculata*) in Cumarú und Iracema (Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
0-10 cm				
Cumarú	-0,893	0,143	0,044	-
Iracema	0,893	-0,143	-0,044	-
10-20 cm				
Cumarú	0,871	0,238	-0,013	-0,130
Iracema	-0,871	-0,238	0,013	0,130

Tabelle 52 Chemische und biologische Bodenparameter (Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm) im Anbau mit *Vigna unguiculata* an den Standorten Cumarú und Iracema zum Zeitpunkt der Bohnensaat

	Bodentiefe 0-10 cm			10-20 cm		
	Cumarú	Iracema	T-Test	Cumarú	Iracema	T-Test
pH(CaCl ₂)	5,20	4,65	***	4,12	4,11	ns
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	7,4	4,0	**	3,6	2,0	***
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,83	2,73	**	2,37	2,31	ns
Ca ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	1,89	1,46	ns	-	-	
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,43	2,01	ns	0,53	0,36	**
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-		0,31	0,74	***
Basensättigung (%)	59	43	***	19	13	***
Urease (µg N g ⁻¹ 2 h ⁻¹)	18,3	21,3	**	15,4	14,4	ns
saure Phosphatase (µg p-NP g ⁻¹ h ⁻¹)	685	1193	***	1345	1639	**

5.2 Ursachen für den Mehr- bzw. Minderertrag bei Mais in Cumarú bzw. Iracema im Anbausystem ohne Brennen gegenüber dem traditionellen Anbau

Der Verzicht auf das Brennen der Brachevegetation hat an den zwei Versuchsstandorten einen gegensätzlichen Effekt auf den Maisertrag. So kommt es in Cumarú zu einer signifikanten Steigerung des Kolbenertrages gegenüber dem traditionellen Anbau mit Brennen, in Iracema dagegen zu einem signifikanten Rückgang des Kornertrages (vgl. IV 1.1, Tabelle 12). Zur Beantwortung der Frage nach den hierfür zugrundeliegenden Ursachen wurden Bodendaten aus dem Anbausystem mit (traditionell) und ohne Brennen eines jeden Standortes zur Berechnung einer Faktorenanalyse zusammengefaßt (Abbildung 25; Tabelle 53). Auf diese Weise sollen die Parameter identifiziert werden, die den Mehr- bzw. Minderertrag der Maiskultur im Anbausystem ohne Brennen bedingen. Die Daten stammen jeweils aus den Probenahmen zum Zeitpunkt der Maisernte.

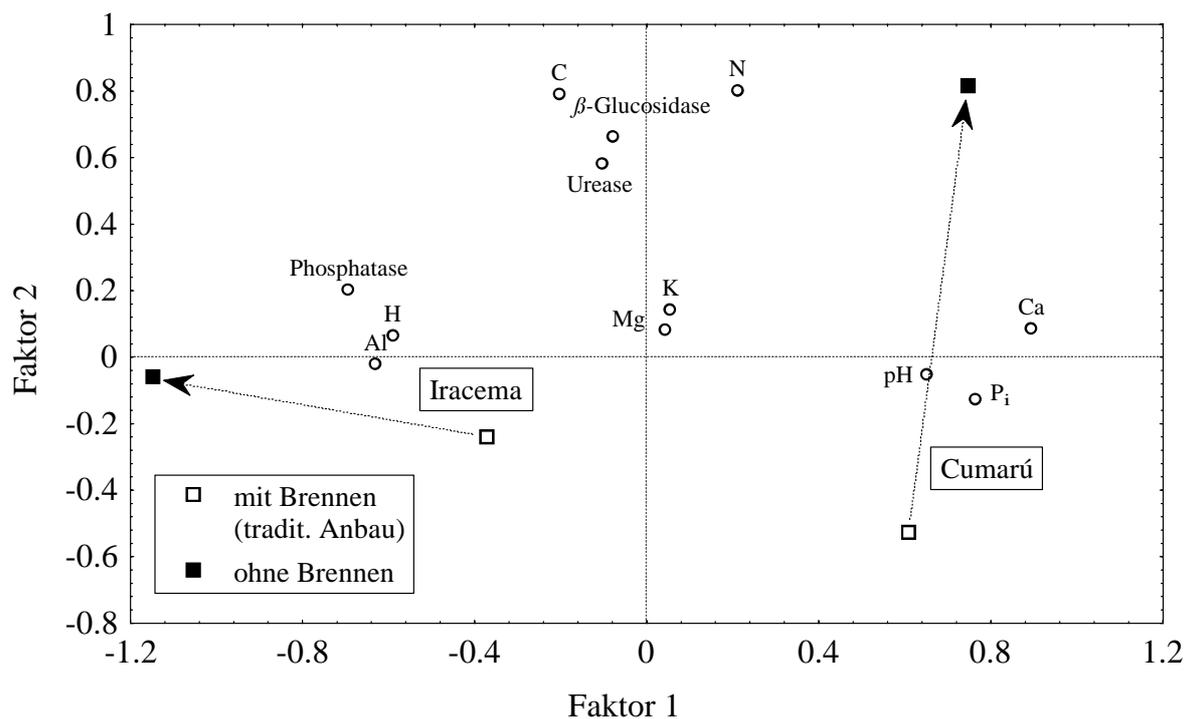


Abbildung 25 Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten (0-10 cm Bodentiefe) im traditionellen Anbau und im Anbau ohne Brennen in Cumarú und Iracema zum Zeitpunkt der Maisernte

Die durch den Verzicht auf das Brennen verursachte Veränderung der Bodeneigenschaften ist in Abbildung 25 mit Hilfe von Pfeilen dargestellt. Es wird deutlich, daß der Effekt an beiden Standorten völlig unterschiedlich ist. In Cumarú verändert sich die Lage des Faktorwertes in positiver Richtung des Faktors 2, in Iracema in negativer Richtung von Faktor 1. Faktor 2 wird dominiert von positiven Faktorladungen von C_{org} und N_t sowie den Aktivitäten der β -Glucosidase und der Urease. Faktor 1 ist positiv korreliert mit dem pH, P_i und Ca^{2+} und negativ korreliert mit Al^{3+} , H^+ und der Phosphatase-Aktivität.

Der $pH(CaCl_2)$ des Bodens liegt in Iracema im traditionellen Anbau mit pH 4,65-5,14 deutlich über den im Anbau ohne Brennen gemessenen Werten von pH 4,39-4,45. Die fehlende, den pH anhebende Wirkung des Brennens hat also eine negative Auswirkung auf den Maisertrag. Ganz anders sieht es am Standort Cumarú aus: es liegt kein enger Zusammenhang zwischen dem pH und dem Maisertrag vor (Abbildung 25). Dabei liegt das Niveau mit pH 5,21-5,65 im traditionellen Anbau bzw. pH 4,85-4,91 im Anbau ohne Brennen deutlich über dem des Standortes Iracema.

Tabelle 53 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich des Effektes des Anbaus ohne Brennen an den Standorten Cumarú und Iracema (Bodentiefe 0-10 cm) zum Zeitpunkt der Maisernte

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
pH(CaCl ₂)	0,650	-0,054	-0,667	-0,199
P _i	0,762	-0,125	-0,227	0,179
C _{org}	-0,204	0,789	0,163	-0,130
N	0,211	0,802	-0,173	0,062
Ca	0,894	0,084	-0,003	-0,091
Mg	0,042	0,083	-0,929	-0,146
K	0,055	0,144	0,291	0,844
Al	-0,630	-0,022	0,141	0,604
H	-0,591	0,066	0,730	0,126
s. Phosphatase	-0,695	0,203	0,637	0,105
Urease	-0,105	0,582	0,397	0,275
β-Glucosidase	-0,079	0,662	-0,159	0,493
Eigenwert	3,140	2,143	2,642	1,544
Wahrscheinlichkeit	0,262	0,179	0,220	0,129

Das niedrige pH-Niveau am Standort Iracema hat vor allem einen Effekt auf den Kationenbelag am Austauscher. So kann im Anbau ohne Brennen im Gegensatz zum Standort Cumarú austauschbares Aluminium in einer Konzentration von 0,16 cmol(+) kg⁻¹ nachgewiesen werden, wobei es in 3 von 7 Wiederholungen unterhalb der Nachweisgrenze lag. Es ist anzunehmen, daß hierin die Ursache für die mangelhafte Entwicklung des Mais zu suchen ist. Die negative Korrelation der Aluminiumkonzentration mit dem Maiskornenertrag ist nicht signifikant, was sicherlich u.a. darauf zurückzuführen ist, daß 8 von 14 Wiederholungen gleich Null sind (bzw. unterhalb der Nachweisgrenze liegen) und so die Streuung der Al-Konzentration mit 0,0 bis 0,4 cmol(+) kg⁻¹ sehr gering ist.

Auch die H⁺-Konzentration weist in Iracema wie die Al-Konzentration eine negative Korrelation zum Maiskornenertrag auf. Diese kann statistisch abgesichert werden ($r = -0,5851^*$, $n=14$).

Calcium ist in Iracema tendenziell negativ mit dem Maiskornenertrag korreliert (ns), was gleichzeitig einen Effekt auf die Korrelation des Maiskolbenenertrages mit der Summe der basischen Kationen ($r = 0,5337^*$, $n=14$) sowie mit der Basensättigung ($r = 0,6073^*$) hat. Der durch den

Verzicht auf das Brennen bewirkte signifikante Rückgang der Ca-Konzentration ($0,98 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ im Anbau ohne Brennen gegenüber $1,43 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ im traditionellen Anbau; vgl. IV 4.1.1 Tabelle 35) kann folglich als eine der Ursachen für den Minderertrag bei Mais in Iracema angesehen werden. In Cumarú war die Ca-Konzentration unverändert und auf einem relativ hohen Niveau geblieben.

Kalium ist in Iracema zum Zeitpunkt der Maisernte negativ mit dem Maiskornertrag korreliert (ns). Für die Diskriminierung der beiden Anbausysteme dürfte es jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen, da sich die K-Konzentrationen nicht signifikant unterscheiden (vgl. IV 4.1.1, Tab. 35).

Tabelle 54 Faktorwerte (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich des Effektes des Anbaus ohne Brennen an den Standorten Cumarú und Iracema (Bodentiefe 0-10 cm) zum Zeitpunkt der Maisernte

		Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Cumarú	traditionell	0,608	-0,527	-1,014	-0,192
	ohne Brennen	0,746	0,815	-0,018	0,492
Iracema	traditionell	-0,370	-0,239	0,595	-1,075
	ohne Brennen	-1,147	-0,058	0,509	0,905

Das Ergebnis der Faktorenanalyse des Standortes Cumarú stellt sich völlig anders dar. Es liegt eine negative Korrelation der P_i -Konzentration mit dem Maiskornertrag ($r = -0,5720^*$) vor (Maiskolbenertrag $r = 0,6292^*$). Im traditionellen Anbau ist die P_i -Konzentration in 0-10 cm Bodentiefe mit $8,4-18,1 \text{ mg kg}^{-1}$ über die gesamte Dauer der Maiskultur z.T. deutlich höher als im Anbausystem ohne Brennen ($5,9-9,0 \text{ mg kg}^{-1}$). Die P-Aufnahme durch den Mais (Stroh + Korn, ohne Spindel) beträgt im traditionellen Anbau $4,1 \text{ mg kg}^{-1}$, im Anbau ohne Brennen $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$. Geht man davon aus, daß die P-Extraktion mit der North-Carolina-Methode (s. III 4.1.3) den Anteil pflanzenverfügbaren Phosphors widerspiegelt, so kann geschlußfolgert werden, daß P kein Mangelfaktor war und somit auch nicht relevant für die Diskriminierung der beiden Anbausysteme.

Die enzymatischen Aktivitäten haben in Cumarú keine Bedeutung für die Diskriminierung der zwei Anbausysteme und deren unterschiedliche Ertragspotentiale. In Iracema liegt eine negative Korrelation der β -Glucosidase-Aktivität mit dem Maiskornertrag ($r = -0,5475^*$, $n=14$) sowie der Urease-Aktivität mit dem Maisstrohgewicht ($r = -0,6023^*$) und der Gesamtphytomasse ($r = -0,5476^*$) vor.

5.3 Ursachen für den Mehrertrag bei Mais im Anbau mit erhöhter NPK-Düngung

Sowohl Kalium als auch Magnesium sind neben den enzymatischen Aktivitäten positiv mit dem Maiskornenertrag korreliert (Abbildung 26; Tabelle 55; Tabelle 56). Die Erhöhung der K-Düngung führt folglich dazu, daß eine durch die K-Aufnahme der Maispflanzen bedingte Abnahme der Kaliumkonzentration im Boden ausbleibt.

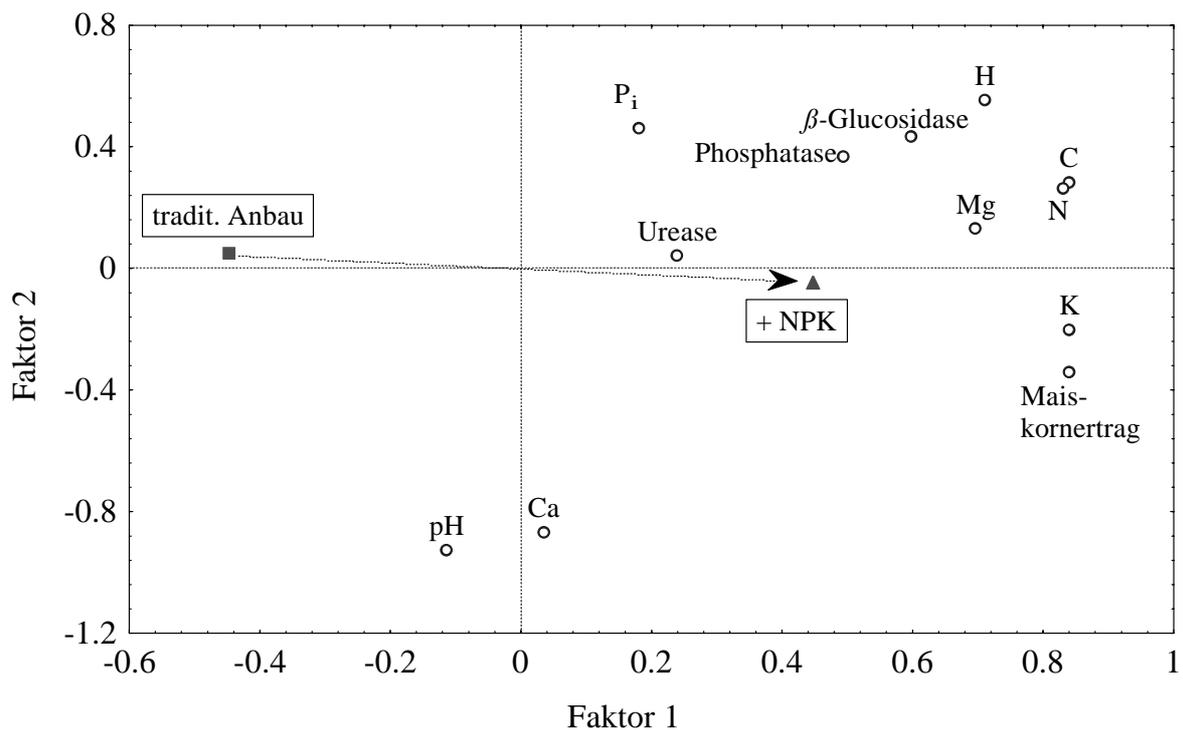


Abbildung 26 Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maiskornenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit zusätzlicher NPK-Düngung am Standort Chagas zum Zeitpunkt der Maisernte

Auch der Gesamt-N-Gehalt zeigt tendenziell eine positive Beziehung zum Maisertrag, ob dieses jedoch ertragsrelevant war, kann nicht mit endgültiger Sicherheit beantwortet werden. Dazu wäre eine statistische Analyse von Bodendaten einer zu Beginn der Anbauphase durchgeführten Bodenprobenahme notwendig gewesen. Das gleiche gilt für die P_i-Konzentration. Zumindest liegt zum Zeitpunkt der Maisernte keine negative Korrelation mit dem Maiskornenertrag vor, wie im Falle des traditionellen Anbausystems in Cumarú, was darauf hindeutet, daß eine bessere P_i-Versorgung der Maiskultur im zusätzlich gedüngten Anbausystem vorliegt.

Tabelle 55 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse im traditionellen Anbau und im Anbau mit zusätzlicher NPK-Düngung am Standort Chagas (Bodentiefe 0-10 cm) zum Zeitpunkt der Maisernte

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Mais- kornertag	0,840	-0,342	0,067
pH(CaCl ₂)	-0,114	-0,928	0,013
P _i	0,181	0,460	-0,809
C _{org}	0,839	0,282	-0,392
N _t	0,831	0,262	0,062
Ca	0,035	-0,871	0,069
Mg	0,696	0,128	0,317
K	0,840	-0,203	0,351
H	0,711	0,551	0,069
s. Phosphatase	0,494	0,364	0,660
Urease	0,239	0,041	0,912
β -Glucosidase	0,597	0,432	0,384
Eigenwert	4,501	2,777	2,465
Wahrschein- lichkeit	0,375	0,231	0,205

Tabelle 56 Faktorwerte (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse im traditionellen Anbau und im Anbau mit zusätzlicher NPK-Düngung am Standort Chagas (Bodentiefe 0-10 cm) zum Zeitpunkt der Maisernte

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
traditioneller Anbau	-0,448	0,049	0,243
+ NPK	0,448	-0,049	-0,243

5.4 Ursachen für den Mehrertrag bei Maniok im Anbausystem mit Bohnen (*Vigna unguiculata*) gegenüber dem traditionellen Anbau

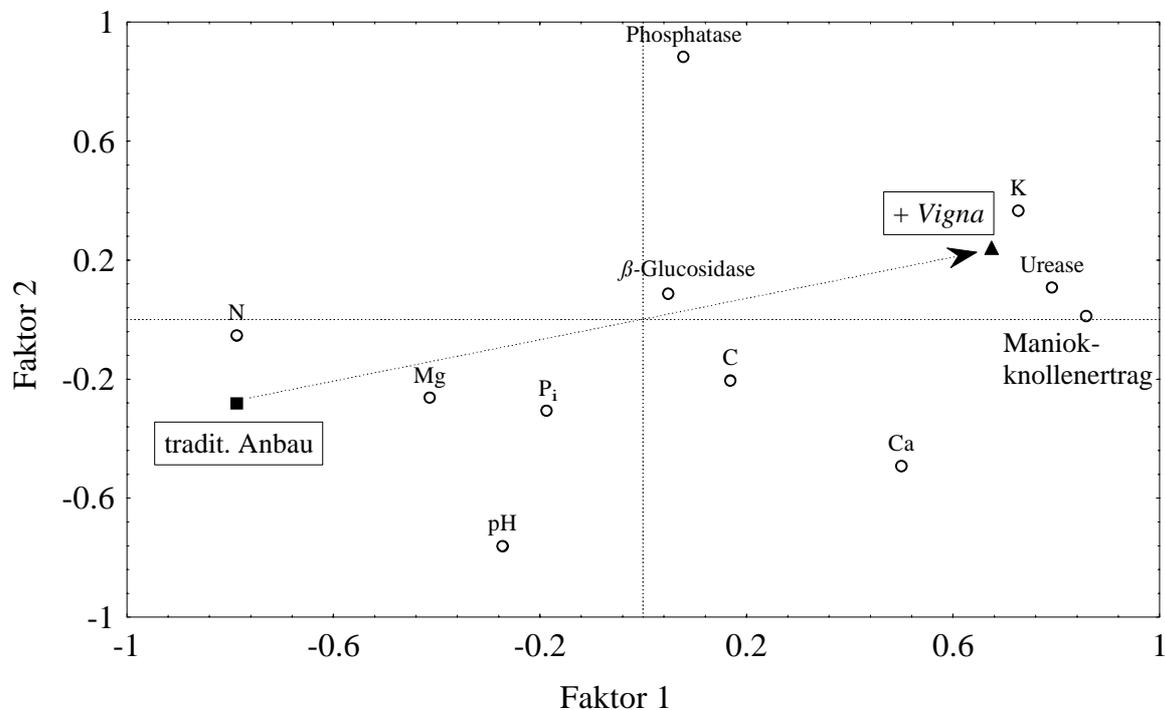


Abbildung 27 Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau (164 Tage nach dem Brennen) und im Anbau mit *Vigna* (248 Tage nach dem Brennen) in Cumarú

Bei der Bearbeitung dieser Fragestellung wurden Bodendaten unterschiedlicher Probenahmezeitpunkte miteinander verrechnet. Entscheidendes Kriterium war dabei der Zeitpunkt des Maniokpflanzens, das im traditionellen Anbau Anfang Februar erfolgte, im Anbau mit *Vigna* Mitte Mai. Die zu vergleichenden Bodenproben sollten im gleichen zeitlichen Abstand von dem Pflanztermin gezogen worden sein. Daher wurden für den traditionellen Anbau die Bodendaten von der Mitte Mai durchgeführten Beprobung verwendet, für den Anbau mit *Vigna* von der Beprobung Ende Juli (Cumarú).

Wie in 5.1.1 bereits belegt, spielt auch hier Kalium für das Ertragsniveau des Maniok die entscheidende Rolle (Abbildung 27, Tabelle 57). Die Konzentration liegt in Cumarú aufgrund der zusätzlichen NPK-Düngung im Anbau mit *Vigna* mit $0,080 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ signifikant über der Konzentration im traditionellen Anbau ($0,061 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$). In Iracema zeigt sich ein von der Tendenz her ähnlicher Zusammenhang.

Tabelle 57 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich des Anbaus mit Integration von Vigna am Standort Cumarú (Bodentiefe 0-10 cm)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
Maniok- knollenertrag	0,858	0,012	-0,094	0,151
pH(CaCl ₂)	-0,272	-0,761	0,448	0,242
P _i	-0,187	-0,306	-0,044	0,838
C _{org}	0,169	-0,205	0,327	0,821
N	-0,787	-0,053	0,358	0,169
Ca	0,500	-0,493	-0,236	0,053
Mg	-0,413	-0,262	0,780	0,021
K	0,726	0,366	0,187	0,464
s. Phosphatase	0,078	0,883	-0,008	-0,286
Urease	0,792	0,109	0,052	-0,435
β-Glucosidase	0,049	0,086	0,959	0,153
Eigenwert	3,077	1,964	2,068	1,997
Wahrschein- lichkeit	0,280	0,179	0,188	0,182

Tabelle 58 Faktorladungen (Varimax normal.) der Hauptkomponentenanalyse zum Vergleich des Anbaus mit Integration von Vigna am Standort Cumarú (Bodentiefe 0-10 cm)

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
traditioneller Anbau	-0,787	-0,282	0,378	0,098
+ Vigna	0,674	0,241	-0,324	-0,084

5.5 Ursachen für den Minderertrag bei Maniok in Cumarú im Anbausystem mit Bohnen als Untersaat (*Canavalia ensiformis*) gegenüber dem traditionellen Anbau

Wie bereits mehrfach nachgewiesen (IV 5.1.1, 5.4), zeigt der Maniokknollenertrag eine eindeutige Abhängigkeit vom Kaliumgehalt des Bodens. Dieser Zusammenhang erklärt auch, warum es durch die Integration der *Canavalia* in Cumarú zu Mindererträgen gekommen ist (Abbildung 28, Tabelle 59, Tabelle 60). Die Kaliumkonzentration ist im Anbau mit *Canavalia* zum Zeitpunkt des Übergangs vom Anbau zur Brache (64 Tage nach dem Pflanzen des Bodendeckers) mit $0,053 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ signifikant gegenüber dem traditionellen Anbau ($0,069 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$) verringert (Tab. 41). Ursache ist die Kaliumaufnahme des Bodendeckers, wie bereits in Kapitel 4.2 ausgeführt wurde.

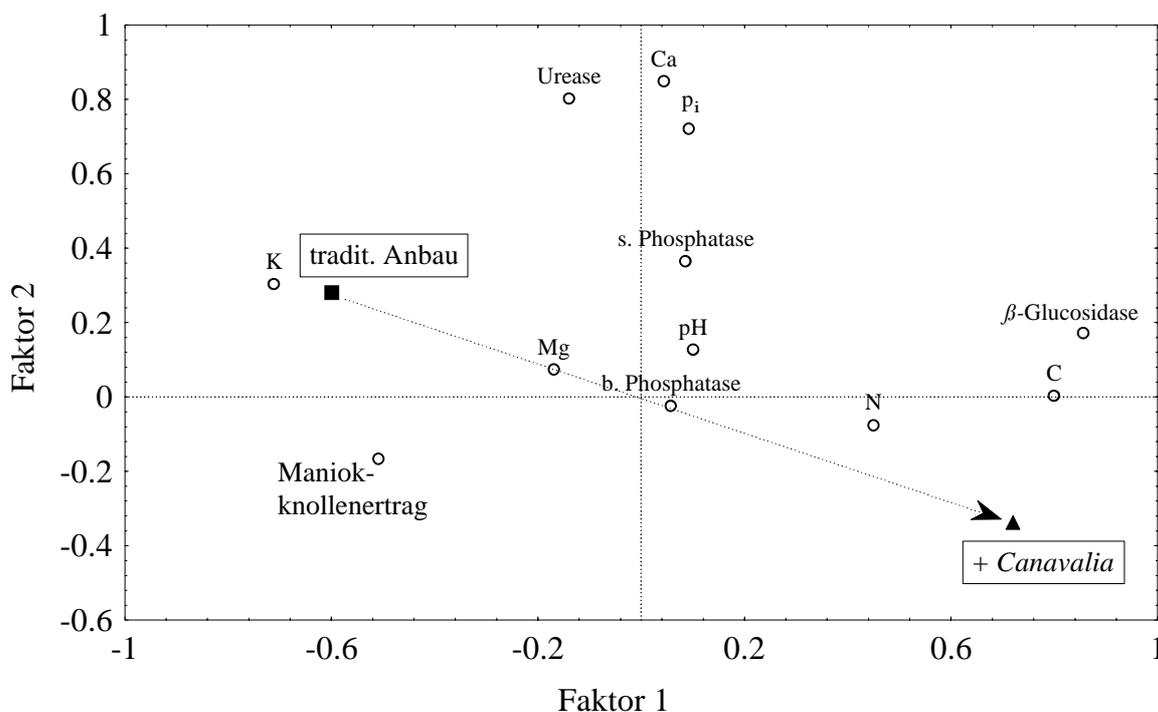


Abbildung 28 Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit *Vigna* in Cumarú

Darüber hinaus bestätigt sich die in Abschnitt 4.2 dargestellte Zunahme des C_{org} - und N_{t} -Gehalt, die eine negative Korrelation mit dem Maniokknollenertrag aufweisen. Zudem ist die β -Glucosidase-Aktivität negativ mit dem Maniokertrag korreliert, wodurch die in Kapitel 4.2 geäußerte Hypothese unterstützt wird, daß die durch den Bodendecker bedingte Erhöhung der ober- und unterirdischen Phytomasse einen positiven Effekt auf den Gehalt der organischen

Substanz und die mit ihr verbundenen mikrobiellen Aktivität hat, ein ähnlicher Effekt also, wie er bereits in Zusammenhang mit hohen Maiserträgen beobachtet wurde (vgl. 5.1.1). Nicht wahrscheinlich ist, daß hiervon ein unmittelbarer negativer Einfluß auf den Maniokertrag ausgegangen ist. Der negative Effekt der Kaliumaufnahme durch den Bodendecker hat u.U. einen positiven Effekt der β -Glucosidase-Aktivität überdeckt (vgl. 5.1.1). Langfristig dürfte die Integration von *Canavalia* einen positiven Effekt auf die Ertragssicherheit späterer Anbauzyklen - vor allem von Mais - haben. Voraussetzung wäre jedoch - vom Standpunkt des Pflanzenproduzenten - eine zusätzliche K-Düngung, um die K-Aufnahme durch den Bodendecker zu kompensieren.

Tabelle 59 Faktorladungen (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit *Vigna* zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation, Cumarú

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5
Maniok- knollenertrag	-0,509	-0,166	-0,021	0,331	-0,650
pH(CaCl ₂)	0,101	0,127	0,935	0,006	0,074
P _i	0,092	0,721	0,460	0,313	0,031
C _{org}	0,800	0,004	0,244	0,204	0,091
N _t	0,450	-0,076	0,102	-0,738	0,275
Ca	0,044	0,849	0,058	-0,104	-0,054
Mg	-0,169	0,074	0,003	0,075	0,925
K	-0,711	0,303	0,123	0,297	-0,050
s. Phosphatase	0,086	0,365	-0,629	0,525	0,301
Urease	-0,139	0,802	-0,209	0,049	0,323
β -Glucosidase	0,856	0,172	-0,010	-0,086	-0,227
basische Phosphatase	0,057	-0,024	0,025	0,924	0,068
Eigenwert	2,420	2,193	1,615	2,038	1,625
Wahrschein- lichkeit	0,202	0,183	0,135	0,170	0,135

Tabelle 60 Faktorwerte (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit Vigna zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation, Cumarú

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5
traditioneller Anbau	-0,600	0,281	-0,086	0,329	-0,387
+ <i>Canavalia</i>	0,720	-0,337	0,104	-0,394	0,464

5.6 Ursachen für den Minderertrag bei Maniok im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung

Wie bereits in den Kapiteln IV 5.1.1, 5.4 sowie 5.5 dargelegt, hat der Kaliumgehalt im Boden auch im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung (Behandlung 6) die entscheidende Bedeutung für den Maniokknollenertrag. Dabei ist die Kaliumkonzentration im Anbau mit

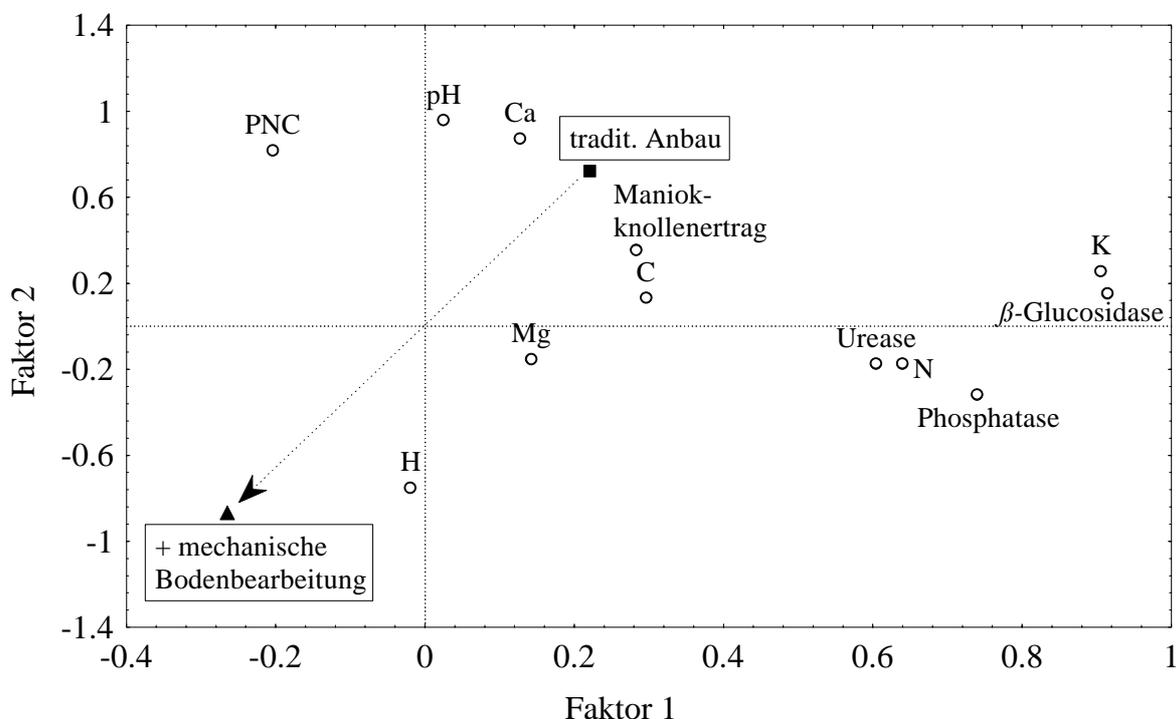


Abbildung 29 Faktorenanalyse (Varimax normal.) der Bodendaten in 0-10 cm Bodentiefe und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung, Chagas

maschineller Bodenbearbeitung zum Zeitpunkt der Maisernte mit $0,07 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ nur geringfügig niedriger als im traditionellen Anbau ($0,08 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$, ns; Tab. 41). Das gleiche gilt für den C_{org} -Gehalt sowie der β -Glucosidase-Aktivität, die im Anbau mit Bodenbearbeitung nur leicht geringere Werte aufweisen als im traditionellen Anbau (9,2 gegenüber $9,5 \text{ g kg}^{-1}$ (ns) bzw. $22,0$ gegenüber $18,3 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (ns); vgl. Tab. 43).

Tabelle 61 Faktorladungen (Varimax normal.) aus der Hauptkomponentenanalyse von Bodendaten (0-10 cm Bodentiefe) und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung, Chagas

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
Maniokknollenertrag	0,283	0,355	0,463
pH(CaCl ₂)	0,025	0,959	0,001
P _i	-0,204	0,818	0,177
C _{org}	0,296	0,133	0,805
N _t	0,640	-0,174	0,551
Ca	0,128	0,872	-0,106
Mg	0,142	-0,152	0,847
K	0,905	0,256	0,057
H	-0,019	-0,752	0,589
s. Phosphatase	0,739	-0,316	0,503
Urease	0,605	-0,173	0,258
β -Glucosidase	0,915	0,153	0,115
Eigenwert	3,225	3,333	2,609
Wahrscheinlichkeit	0,269	0,278	0,217

Tabelle 62 Faktorladungen (Varimax normal.) aus der Hauptkomponentenanalyse von Bodendaten (0-10 cm Bodentiefe) und dem Maniokknollenertrag im traditionellen Anbau und im Anbau mit maschineller Bodenbearbeitung, Chagas

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
traditioneller Anbau	0,221	0,722	-0,055
+ mechanische Bodenbearbeitung	-0,265	-0,866	0,066

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit Hilfe der Faktorenanalyse wurde ein Zusammenhang zwischen den Bodendaten und der landwirtschaftlichen Produktivität hergestellt. Hierbei wurden teils Ergebnisse aus den Kapiteln 3 und 4 bestätigt, teils neue Zusammenhänge deutlich.

Es bestätigt sich, daß der Maniokknollenertrag in hohem Maße von der Kaliumkonzentration des Bodens abhängig ist. Dies muß z.B. bei der Integration einer Untersaat berücksichtigt werden (s. 5.5), um - wie im vorliegenden Fall - ein Absinken des Maniokertrages aufgrund hoher Kaliumaufnahme der *Canavalia* zu verhindern.

Die Höhe des Bohnenertrages zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der P_i -Konzentration im Boden. Darüber hinaus geht von einer erhöhten Al^{3+} -Konzentration in 10-20 cm Bodentiefe am Standort Iracema ein negativer Effekt auf den Bohnenertrag aus.

Als problematisch bei der Interpretation des Zusammenhanges zwischen Bodendaten und Maiserträgen erweist sich die Tatsache, daß am Standort Chagas nur zum Zeitpunkt der Maisernte Bodenproben gezogen wurden. Ein früherer Beprobungstermin, z.B. kurz nach der Maissaat, wäre aufschlußreicher und einfacher zu interpretieren gewesen.

Die Faktorenanalyse stellt sich als vielversprechendes Instrumentarium dar. Als problematisch haben sich Analysen kleiner Datenmengen, insbesondere bei geringen Wiederholungszahlen erwiesen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß eine isolierte Betrachtung der einzelnen Standorte am ehesten Aufschluß über die Interaktionen/Interrelationen der Bodendaten bzw. zwischen Boden- und Ertragsdaten liefern kann. Eine Verrechnung verschiedener Flächen oder Systeme ist dagegen besser geeignet, wenn geprüft werden soll, ob Bodenparameter eine Abhängigkeit von vorhandene Gradienten wie Produktivität (Erträge) oder Nutzungsintensität aufweisen.

6 Beziehung zwischen den Bodendaten und der Nutzungsintensität von Anbausystemen

Als Bezugsbasis für die Beurteilung unterschiedlicher Anbau- und Nutzungssysteme dient das traditionelle Anbausystem. In einem ersten Schritt wurde mit Hilfe der Diskriminanzanalyse der Zeitreihencharakter der einzelnen Phasen des Anbaus visualisiert, um diesem dann in einem zweiten Schritt modifizierte Anbausysteme gegenüberzustellen. In einem dritten Schritt wird die Bedeutung der Bodenparameter für die Unterschiedlichkeit der Anbauphasen bzw. Anbausysteme analysiert (diskriminatorische Bedeutung) und diskutiert.

6.1 Visualisierung des Zeitreihencharakters der Phasen des traditionellen Anbausystems

Zur Darstellung des Zeitreihencharakters des traditionellen Anbausystems wurden Bodendaten mit Hilfe einer Diskriminanzanalyse ausgewertet, wobei es sich um einen sog. Mehrgruppenfall handelt (HARTUNG & EPELT 1992). Dabei wurde die Anzahl der Probenahmezeitpunkte

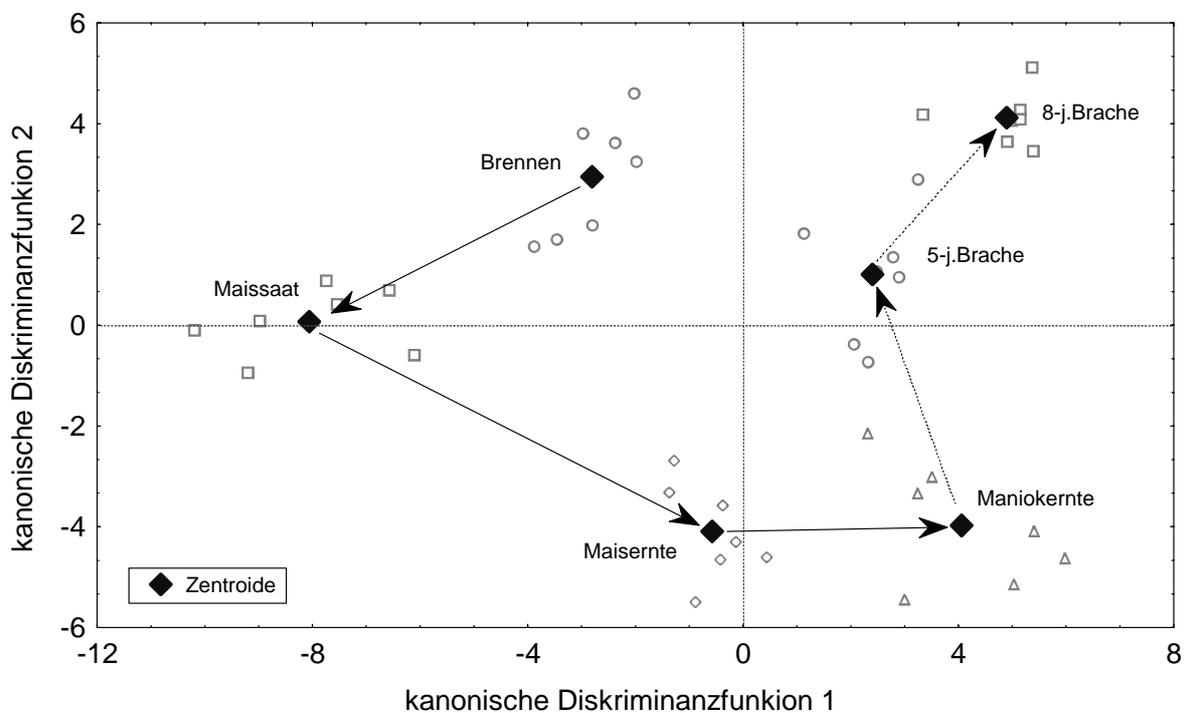


Abbildung 30 Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus in Cumarú basierend auf Bodendaten der Bodentiefe 0-10 cm

beschränkt, um die Übersichtlichkeit der grafischen Darstellung zu gewährleisten. Abbildung 30 zeigt deutlich den zeitlichen Ablauf des traditionellen Anbaus - ausgehend vom Zustand unmittelbar vor dem Brennen ("Brennen"), über die Maissaat und -ernte, die Maniokernte bis hin zur Brache wird eine U-Form (Hufeisen) beschrieben, die man von der 5-jährigen Brache zur 8-jährigen Brache ergänzen könnte (gestrichelter Pfeil; Anhang 9).

6.2 Bewertung der Nutzungsintensität modifizierter Anbausysteme

Zur Beurteilung modifizierter Anbausystemen wurden Bodendaten in die Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbausystems (6.1) aufgenommen. Dabei wurde auf die Darstellung der gesamten Anbauphase zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit der Grafik verzichtet (Abbildung 31a,b). Der in Abbildung 30 dargestellte U-förmigen Verlauf der Zeitreihe geht auf diese Weise verloren, was jedoch nichts an der Tatsache ändert, daß es sich um eine Zeitreihe handelt. Die Beschränkung auf die Endphase des traditionellen Anbaus ermöglicht darüber hinaus eine Gegenüberstellung der Standorte Cumarú und Iracema. Es sind lediglich die Gruppenzentroide abgebildet.

Der Zeitpunkt "Maniokernte", dargestellt durch den Zentroiden der Punktwolke, repräsentiert das Ende der traditionellen Anbauphase. Die Verbindung dieses Punktes mit den Zentroiden der 5- und der 8-jährigen Brache beschreibt eine Gerade (durchgezogene Pfeillinie), die nichts anderes ist als die Visualisierung der Veränderung der einbezogenen Bodenparameter (s. Anhang 10c für Cumarú bzw. Anhang 10f für Iracema) während der 8-jährigen Brachephase des traditionellen Anbausystems (Abbildung 31a,b).

Als Gegenpol zum Übergang in die Brachephase dient die Einbeziehung des semipermanenten Anbausystems. Die zu beantwortende Frage lautet, wie sich eine Weiterführung der Anbauphase, also ein Verzicht auf die Brache, auf den Datenpool - hier repräsentiert durch den Gruppenzentroiden "semipermanenter Anbau" - auswirken würde. Es wird deutlich, daß die Richtung, ausgehend von der "Maniokernte" (gestrichelte Pfeillinie), eine gänzlich andere ist.

Die beiden Formen der Nutzung (die traditionelle Brachephase sowie der semipermanente Anbau) gehen also in der grafischen Darstellung scherenförmig auseinander. In Richtung der durchgezogenen Pfeile nimmt die Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung ab, in Richtung des gestrichelten Pfeils dagegen zu. Beide Pfeilrichtungen beschreiben im zweidimensionalen Raum eine Art Meßlatte für den Gradienten "Nutzungsintensität". Mit Hilfe dieser Darstellung soll der Zustand modifizierter Anbausysteme beurteilt werden.

Die Zentroide der drei modifizierten Anbausysteme 'Anbau mit *Vigna*' (Behandlung 3), 'Anbau ohne Brennen' (Behandlung 4) und 'Anbau mit *Canavalia*' (Behandlung 5) liegen sowohl in Cumarú (Abbildung 31a) als auch Iracema (Abbildung 31b) im Bereich des zeitgleich beprobten traditionellen Anbaus "Maniokernte". Es wird jedoch deutlich, daß an

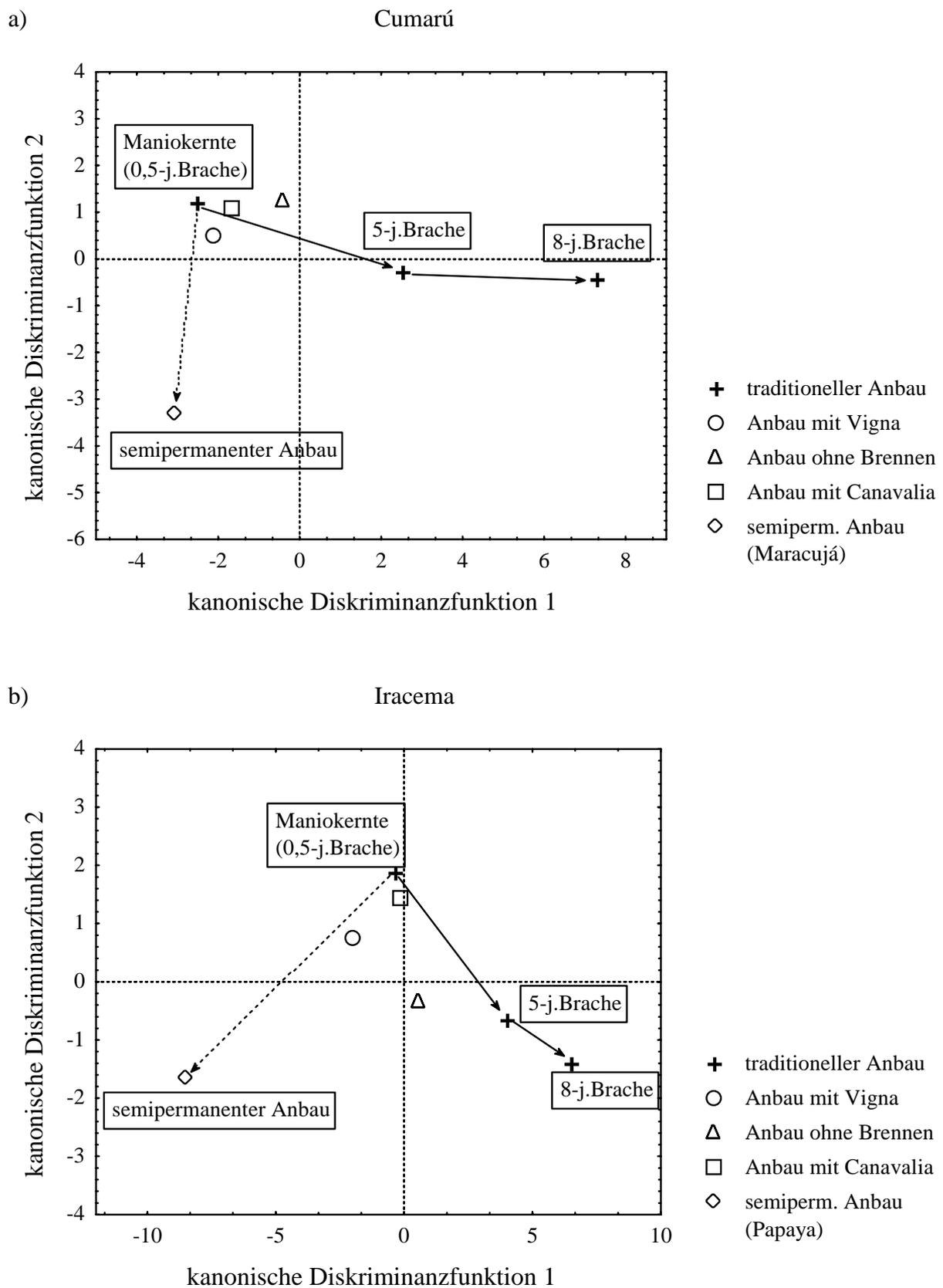


Abbildung 31a,b Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus, eines semipermanenten Anbausystems sowie modifizierter Anbausysteme in (a) Cumarú und (b) Iracema, basierend auf Bodendaten der Bodentiefe 0-10 cm (einbezogene Parameter s. für Cumarú Anhang 10c, für Iracema Anhang 10f)

beiden Standorten der Gruppenzentroid des Anbausystems ohne Brennen eine geringere räumliche Distanz zu der 5-jährigen Brache aufweist als der Zentroid des traditionellen Anbaus. Diese Beobachtung bestätigt sich, berechnet man die quadrierte Mahalanobis-Distanz (Anhang 10a und Anhang 10d), wobei es sich um ein verallgemeinertes Distanzmaß handelt. Das Anbausystem ohne Brennen liegt in Cumarú bzw. Iracema mit 20,4 bzw. 17,6 deutlich näher an der 5-jährigen Brache als der traditionelle Anbau mit 35,7 bzw. 31,0. Der Anbau mit *Vigna* weist mit 31,6 bzw. 46,2 höhere Distanzen zur Brache auf, ebenso der Anbau mit *Canavalia* (26,4 bzw. 25,0; Anhang 10a und Anhang 10d). Berechnet man die Wahrscheinlichkeitsniveaus für die Unterschiedlichkeit der Gruppen, so zeigt sich, daß sich das Anbausystem ohne Brennen sowohl in Cumarú als auch in Iracema signifikant ($p = 0,020$ (Anhang 10b) bzw. $p = 0,019$ (Anhang 10e)) vom traditionellen Anbau zum Zeitpunkt der Maniokernte unterscheidet. Die Anbausysteme mit *Vigna* bzw. *Canavalia* unterscheiden sich dagegen nicht vom traditionellen Anbau (in Cumarú $p = 0,606$ bzw. $p = 0,289$ (Anhang 10b); in Iracema $p = 0,096$ bzw. $p = 0,941$; Anhang 10e).

Die vorliegende Ergebnisse werden dahingehend interpretiert, daß der Verzicht auf das Brennen die Nutzungsintensität des Anbausystems (zum Zeitpunkt der Maniokernte) herabsetzt. Umgekehrt hieße das, daß zum Erreichen des gleichen Bodenzustandes im Anbausystem ohne Brennen eine geringere Brachedauer erforderlich wäre als im traditionellen Anbau. Die Integration von Leguminosen brachte hingegen in dieser Hinsicht keinen Vorteil.

6.3 Bedeutung einzelner Bodenparameter für die Diskriminierung verschiedener Anbausysteme

Eine signifikante Bedeutung für das Modell der Daten in Cumarú weisen die Phosphatase-Aktivität, der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Wert sowie die Konzentrationen von $\text{Ca}+\text{Mg}$ und Kalium auf (Anhang 10c). In Iracema (Anhang 10f) sind die Phosphatase-Aktivität, der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Wert sowie die β -Glucosidase-Aktivität von Bedeutung für die Diskriminierung der Gruppen (Bracheflächen, Anbausysteme).

Da an beiden Standorten die Phosphatase-Aktivität und der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Wert die höchste diskriminatorische Relevanz besitzen, wurde eine schrittweise Modellrechnung durchgeführt, bei der nach und nach alle Variablen bis auf die beiden genannten aus dem Modell entfernt wurden. Es zeigt sich sowohl für Cumarú als auch Iracema ein nahezu identisches Bild: mit den Parametern Phosphatase und $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ kann praktisch derselbe grafische Zusammenhang dargestellt werden wie mit dem gesamten Variablenpool (Abbildung 32 a,b). Diese enorme Reduzierung des Datenumfangs bzw. der Variablenzahl zeigt u.U. einen Weg auf, wie mit relativ geringem Analyseaufwand eine Aussage über die Vornutzung und damit über den Zustand einer landwirtschaftlichen Fläche gemacht werden kann.

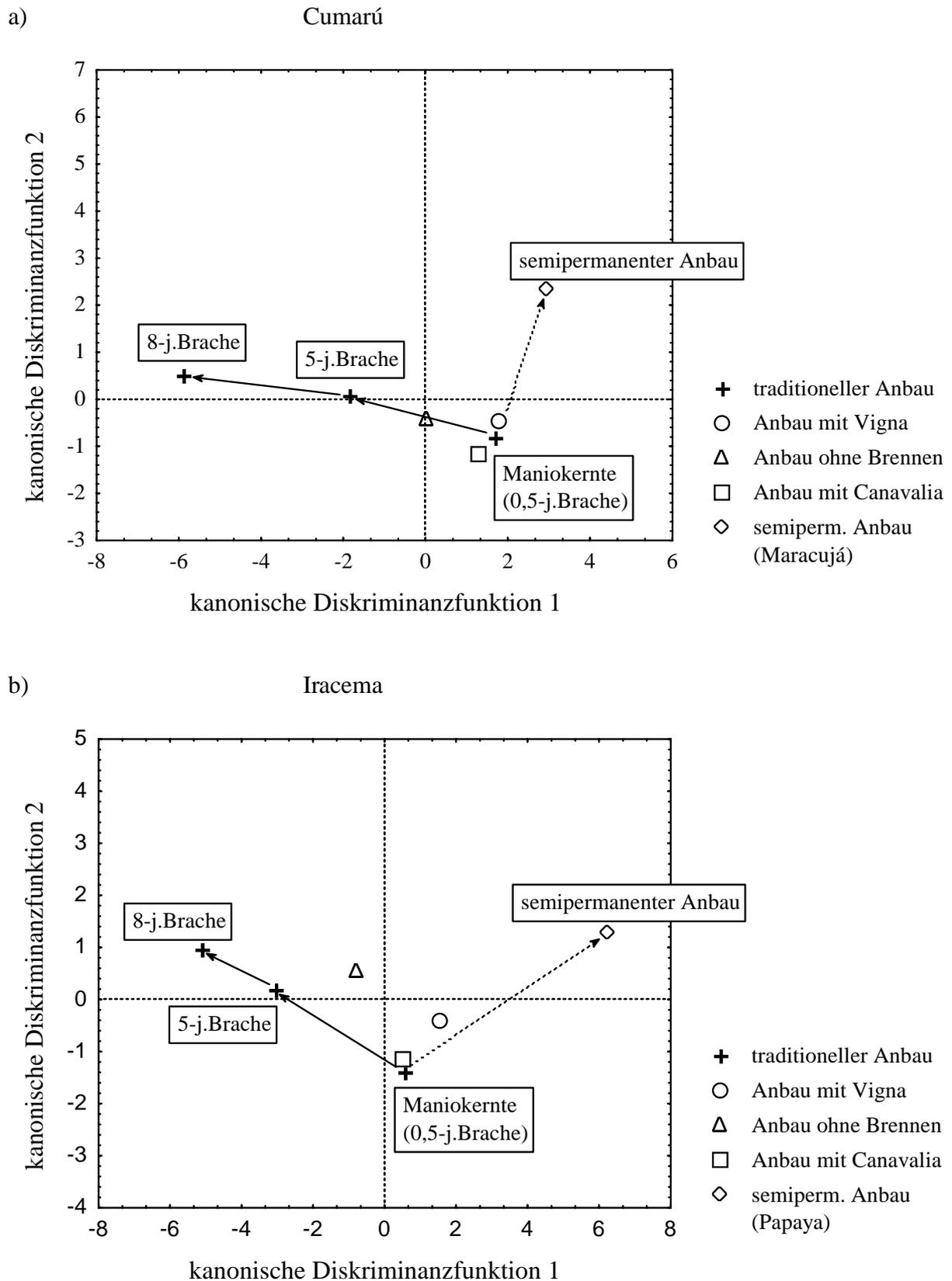


Abbildung 32 a,b Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus, eines semipermanenten Anbausystems sowie modifizierter Anbausysteme in (a) Cumarú und (b) Iracema, ausschließlich basierend auf der Aktivität der sauren Phosphatase und dem pH-Wert der Bodentiefe 0-10 cm (Tabellen s. Anhang 11)

V Abschließende Diskussion

Zur Problematik der Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Nutzungssystemen

Die anfangs formulierte Hypothese, daß Bodenparameter, die sich während der Brachephase verändern, potentielle Indikatoren für die Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Nutzungssystemen sind, muß relativiert werden. Die Untersuchung des Brachesystems hat gezeigt, daß es hinsichtlich der nachhaltigen Produktivität zu widersprüchlichen Prozessen im Boden der Bracheflächen kommt: Bodenversauerung und Verarmung an basischen Kationen stellen Prozesse dar, die ganz offensichtlich einer nachhaltigen Produktivität des Bodens abträglich sind. So käme der Boden einer 30-jährigen Brache kaum für eine landwirtschaftliche Nutzung in Frage. Der Boden ist für diese Parameter also ein denkbar schlechter Indikator.

Bei der Untersuchung dieser Parameter müßte daher die Betrachtung der Bodenverhältnisse um die der Vegetation erweitert werden. Nur auf diese Weise kann die anfangs formulierte Prämisse, daß die potentielle Produktivität des Systems im Laufe der Brache zunimmt, aufrecht erhalten werden.

Bei der Suche nach Bodenindikatoren für die nachhaltige Produktivität von Nutzungssystemen ist man auf solche Parameter beschränkt, die im Verlauf der Brache zumindest teilweise in Form organischer oder mikrobieller Bindungen im Boden verbleiben. Dieses ist z.B. nur sehr eingeschränkt bei den basischen Kationen (Calcium, Kalium) der Fall; diese werden zum Großteil von der Brachevegetation aufgenommen, was eine Abnahme ihrer Bodenkonzentration zur Folge hat. Im Gegensatz dazu deckt sich der Anstieg an mikrobiell und organisch gebundenem Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor im Boden während der Brache mit der als Hypothese formulierten Zunahme der nachhaltigen Produktivität des Bodens. Der breiten Anwendung dieser Parameter als Indikatoren laufen jedoch vor allem zwei Aspekte zuwider: (a) eine relativ geringe Analyseempfindlichkeit im Fall von C_{org} , N_t und P_t und (b) ein großer Einfluß der Probenbehandlung vor und während der Analyse auf das Analyseergebnis bei mikrobiellem Biomasse-C und -P, der mikrobiellen Respiration und der enzymatischen Aktivitäten (saure und basische Phosphatase, Urease). Hinzu kommt das Fehlen internationaler Standards. Gerade die beiden letzten Aspekte machen einen Vergleich der Analyseergebnisse verschiedener Autoren und damit eine umfassende Bewertung problematisch.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma bestünde darin, die Untersuchungsergebnisse in Bezug zu einer gleichzeitig beprobten Referenzfläche zu setzen. Dies gilt einmal für zeitlich punktuelle Bodenprobenahmen, jedoch noch vielmehr für die Erfassung des zeitlichen Verlaufes der Ver-

änderung biologischer Bodenparameter (C_{mik} , P_{mik} , mikrobielle Respiration, enzymatische Aktivitäten). Dies haben die nahezu identischen Ergebnisse, dargestellt in Form relativer Veränderungen gegenüber der Referenz, an den beiden grundverschiedenen Standorten Cumarú und Iracema gezeigt.

Die Anlage von Feldversuchen bietet die Möglichkeit, die Veränderung der zu untersuchenden biologischen Parameter auf den Effekt der jeweiligen Behandlungen zurückzuführen. Dabei ist man jedoch in der Regel auf solche Behandlungen beschränkt, die kurzfristig Effekte zeigen. Die Anlage von Bracheflächen mit natürlicher Sukzession ist zudem nicht möglich. Außerdem bliebe die Vergleichbarkeit mit anderen Publikationen dennoch begrenzt, da so etwas wie eine absolute Referenz nicht existiert.

Ein großes Problem stellt in diesem Zusammenhang die Wahl des Probenahmezeitpunktes dar. Dies macht der Vergleich zwischen der Bilanzierung des Anbaueffekts (zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation nach dem letzten Hacken in der Maniokkultur) und der Erfassung der Bodenveränderungen im Verlauf der Anbauphase deutlich. Das Beispiel der β -Glucosidase-Aktivität zeigt keine Unterschiede zwischen Anbau- und Brachefläche zum Zeitpunkt der Bilanzierung, jedoch deutlich geringere Aktivitäten in der Anbaufläche als in der Brachefläche nahezu während der gesamten Anbauphase. Bei einer Momentaufnahme zum Ende der Anbauphase wäre dieser Unterschied übersehen worden.

Eine ähnliche Fehlinterpretation ist bei Calcium, Kalium und extrahierbarem Phosphor möglich. Die höheren Gehalte im Boden der Anbauflächen zum Zeitpunkt der Bilanzierung des Anbaueffektes spiegeln in keinsten Weise aufgetretene Verluste, z.B. durch Auswaschung, wider, also Prozesse, die für die nachhaltige Produktivität des Nutzungssystems maßgeblich sind.

Da eine kontinuierliche Beprobung sowohl aus arbeitstechnischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen in den meisten Fällen nicht möglich sein dürfte, müßten die Bodenprobenahmen gezielt vorgenommen werden, d.h. in Abhängigkeit von landwirtschaftlichen Aktivitäten oder klimatischen Ereignissen. Auf das traditionelle Anbausystem mit Brennen angewendet, würde das bedeuten, daß die Beprobung nach den ersten größeren Niederschlägen im Anschluß an das Brennen der Brachevegetation bzw. der Düngung der Maiskultur zu erfolgen hätte. Das Ausmaß der zu diesem Zeitpunkt gemessenen Bioelementeinträge in den Boden, könnte ein geeignetes Maß zur Abschätzung der Austragsraten von Calcium, Kalium, Magnesium sowie Phosphor aus dem Oberboden darstellen. Dabei handelt es sich um Austräge aus dem von den Kulturpflanzen durchwurzelbaren Bereich und nicht aus dem System (vgl. HÖLSCHER 1995). Die Höhe dieser Verluste wäre ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der nachhaltigen Produktivität des Anbausystems.

Ein anderer Ausweg aus der Problematik der Wahl des Probenahmezeitpunktes könnte die Erfassung und Kombination von zwei oder mehreren chemischen und biologischen Parametern und deren Verrechnung sein. Dies wurde im Fall der mikrobiellen Biomasse bereits teilweise realisiert. So scheint mit Hilfe der Quotienten $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ und $P_{\text{mik}}/P_{\text{i}}$ eine Beurteilung von Umlagerungsprozessen zwischen mikrobiellen und organischen bzw. organischen und anorganischen Kompartimenten möglich zu sein. Gerade die Gegenüberstellung organischer oder mikrobieller Kompartimente einerseits und anorganischer Kompartimente andererseits könnte die teils widersprüchlichen, während der Brache ablaufenden Veränderungen widerspiegeln. Was auch hier fehlt sind Daten einer größeren Anzahl von Standorten und Nutzungssystemen in den Tropen. In diesem Zusammenhang wären auch Untersuchungen des mikrobiellen Biomasse-Stickstoffs und -Schwefels von Interesse.

Ein interessanter Weg bei der Beurteilung der nachhaltigen Produktivität eines Bodens könnte die Betrachtung der Beziehungen einzelner Bodenparameter zueinander sein. So fiel auf, daß bei semipermanenter Nutzung der im traditionellen Anbau durchweg nachweisbare positive Zusammenhang zwischen pH-Wert und saurer Phosphatase ins Negative verkehrt war. Ursache war, daß nicht mehr primär die Bodenreaktion für die Höhe der Phosphataseaktivität entscheidend war, sondern der geringe C_{org} -Gehalt und die hohe P_{i} -Konzentration. Die Interpretation dieser Veränderung ist sicherlich schwierig und bedürfte weiterer grundlegender Untersuchungen.

An dieser Stelle muß man sich jedoch die generelle Frage stellen, ob das Zustandekommen einer Kennzahl, eines Indikators, bis ins letzte Detail erklärbar sein muß oder ob es nicht ausreicht, eine u.U. abstrakte Maßzahl zur Verfügung zu haben, auf deren Grundlage Beratungsempfehlungen für eine veränderte Nutzung gegeben werden können.

Die Verrechnung von Bodendaten mit Hilfe multivariater statistischer Analyseverfahren geht in diese Richtung. Hauptziel dieser Verfahren ist eine Reduzierung der Datenmenge. So konnte mittels einer Diskriminanzanalyse gezeigt werden, daß unter Beschränkung auf die Parameter 'pH-Wert' und 'Aktivität der sauren Phosphatase' eine Diskriminierung und Beurteilung verschiedener Anbausysteme möglich ist. Die Erfassung enzymatischer Aktivitäten hat dabei den Vorteil, daß sie, wie im Fall der sauren Phosphatase, auch den Zustand anderer zu ihr in Beziehung stehender Parameter (C_{org} , P_{mik} , P_{i}) widerspiegeln. Auch hier könnten Quotienten aus mikrobiellen, organischen und anorganischen Fraktionen einen hohen Informationswert besitzen.

Die Auswahl zu analysierender chemischer und biologischer Bodenparameter hängt sicherlich in erster Linie von der zu untersuchenden Fragestellung ab. Multivariate statistische Verfahren eröffnen jedoch die Möglichkeit, (a) den Analyseaufwand von vornherein klein zu halten und (b) eine über den Informationswert der erfaßten Parameter hinausgehende Bewertung des Bodenzustandes einer Fläche vorzunehmen.

Eine zukünftige wissenschaftliche Verwertung muß zum Ziel haben, andere Nutzungssysteme und Standorte mit Hilfe des genannten Ansatzes zu charakterisieren, so daß (a) eine sichere Auswahl der zu analysierenden Parameter erfolgt und (b) ausreichend Datenmaterial verfügbar ist, auf dessen Grundlage die Bewertung der nachhaltigen Produktivität einer Fläche vorgenommen werden kann.

Die Bedeutung der Brachevegetation im traditionellen Anbausystem

Die vorrangige Bedeutung der Brachevegetation als integraler Bestandteil des traditionellen Anbausystems besteht in der Einbindungen von Bioelementen in organische und mikrobielle Pools im Boden und der Vegetation. Hierdurch werden Verluste aus dem System, hervorgerufen z.B. durch Auswaschung oder Erosion, verringert. Dabei sollte zwischen zwei Aspekten differenziert werden: (a) der Schutzfunktion für auswaschungsgefährdete Nährstoffe und (b) den pedologischen Veränderungen, die auf das Wachstum der Brachevegetation zurückgehen (Laubfall, höhere Wurzellängendichte etc.). Hierunter würden z.B. Veränderungen der Kohlenstoff- und Phosphorfraktionen fallen, deren wissenschaftliche Untersuchung sich geradezu aufdrängt (KATO, in Vorbereitung). Zu einem u.U. bedeutenden Nährstoff-Input in das Brachesystem kann es in Form der Stickstofffixierung durch Leguminosen kommen, wenn diese Bestandteil der Brachevegetation sind (THIELEN-KLINGE 1997).

Für die Beurteilung der Brachevegetation als Teil des Anbausystems muß insbesondere bewertet werden, auf welche Weise der Umbruch, sprich die Bereitstellung der Nährstoffe erfolgt. Unter dem Gesichtspunkt einer ressourcenschonenden Freisetzung pflanzengebundener Nährstoffe wäre der Umbruch relativ junger Bracheflächen sicher effektiver, da die in alten Brachevegetationen gebundenen Nährstoffmengen den Bedarf der Kulturpflanzen bei weitem übersteigen, was die Gefahr hoher Nährstoffverluste impliziert. So gesehen könnte eine zeitliche Begrenzung der Brachedauer durchaus sinnvoll sein. Abgewogen werden müßte jedoch, inwieweit ein in jungen Bracheflächen geringerer Gehalt an organischen und mikrobiellen Verbindungen einen negativen Effekt auf nachhaltige Produktivität des Nutzungssystems hätte. Vor diesem Hintergrund ist die Anreicherung der Brachevegetation (a) mit schnellwachsenden Arten zur Erhöhung der Phytomasseproduktion und (b) mit baumartigen Leguminosen zur Verbesserung der Stickstoffbilanz zu sehen (BRIENZA, in Vorbereitung).

In Zusammenhang mit der Ernährung der Kulturpflanzen dürfte auch nicht unbedeutend sein, daß die Brachephase dazu beiträgt, daß sich generativ vermehrende Wildpflanzen in ihrer Bedeutung zurückgedrängt werden, wodurch die Konkurrenz durch Unkräuter während der Anbauphase verringert wird.

Welchen Effekt ein vollständiger Verzicht auf die Brachephase im Hinblick auf chemische und biologische Bodencharakteristika haben kann, deutet sich bei der Untersuchung semi-permanenter Anbausysteme an. Zu einer endgültigen Beantwortung dieser Fragestellung wären jedoch langfristige Studien notwendig.

Möglichkeiten der Modifikation des traditionellen Anbausystems

Die Inkulturnahme in Form des traditionellen Anbaus bedeutet prinzipiell eine Freisetzung von organischen und mikrobiellen Nährstoffpools im Boden und in der Vegetation und damit die Gefahr von Bioelementverlusten. Ein Anbausystem, welches auf die Erhaltung der nachhaltigen Produktivität abzielt, muß diese Verluste minimieren, aber auch die Ernährung der Kulturpflanzen sicherstellen. Im traditionellen Anbau bedarf diese Sicherung der Nährstoffversorgung hoher Nährstoffeinträge, womit Verluste insbesondere durch Volatilisierung und Verlagerung in nicht von den Kulturpflanzen durchwurzelbare Bodentiefen verbunden sind.

Ein Ansatz zur Minimierung von Auswaschungsverlusten bestünde darin, die Zeitspanne zwischen dem Brennen der Brachevegetation und der Maissaat so kurz wie möglich zu halten. Sollten die Niederschläge hierfür nicht ausreichen, wäre zu überlegen, ob nicht die Einsaat einer Zwischenfrucht vor oder bei Einsetzen der ersten Regenfälle im Dezember zu einer Verringerung der Nährstoffverluste beitragen könnte. Zum Zeitpunkt der Maissaat müßte abgewogen werden, ob man die Zwischenfrucht tothackt oder stehenläßt. Die Integration von *Canavalia ensiformis* in das traditionelle Anbausystem hat zumindest für Kalium gezeigt, daß nennenswerte Mengen aufgenommen und so vor der Auswaschung bewahrt werden. Die im vorliegenden Feldversuch durchgeführte Aussaat der *Canavalia* zum Zeitpunkt der Maisernte kommt für einen nachhaltigen Effekt jedoch deutlich zu spät.

Ein anderer Ansatz könnte ein unvollständiges Brennen der abgeschlagenen Brachevegetation sein. Nicht gänzlich verbranntes Pflanzenmaterial würde zu einer langsam fließenden Nährstoffquelle werden, u.U. ein Beitrag zum Erhalt von Nährstoffen im System. Möglich wäre solch ein Brennen bei ungünstigen Bedingungen (z.B. starker Wind) oder bei nicht vollständig trockener Vegetation (früher als üblich oder nach den ersten Regenfällen). Die Realisierbarkeit eines solchen Vorgehens ist jedoch recht fraglich, da der Kleinbauer i.d.R. bemüht ist, ein hell und hoch loderndes Feuer zu entfachen, um die Flächen „sauber“ zu bekommen.

Der am weitesten gehende Eingriff in das traditionelle Anbausystem stellt ein „feuerloser“ Anbau dar. Die Nährstoffnachlieferung ist hier deutlich verlangsamt, so daß Auswaschungs-

verluste minimiert werden - das Problem hoher Volatilisierungsverluste entfällt zudem vollständig.

Die vorliegenden Daten belegen, daß ein Verzicht auf das Brennen einen positiven Effekt auf die mikrobiellen Aktivitäten und die Nährstoffpools im Boden hat. Sie zeigen aber auch, daß es gerade vor dem Hintergrund der nachhaltigen Produktivität unabdingbar ist, Kenntnisse über die Ausgangsbedingungen vor der Inkulturnahme einer Fläche zu haben. Für die Praxis bedeutet dies, daß vor der Inkulturnahme mindestens der pH-Wert der oberen Bodenschicht kontrolliert werden sollte. Ein $\text{pH}(\text{CaCl}_2) < 4,5$ in 0-10 cm Bodentiefe birgt die Gefahr, daß ein Verzicht auf das Brennen zu Aluminiumtoxizität und zu einem Nährstoffmangel (z.B. Calcium) führt. Dies hätte Ertragseinbrüche insbesondere bei Mais zur Folge. So zeigt CHIDUMAYO (1987) anhand von Untersuchungen in Sambia, daß durch den Verzicht auf das Brennen die Erträge von Fingerhirse (*Eleusine coracana*) deutlich abnahmen, und zwar um 77 %.

Als ein weiteres Problem des Anbaus ohne Brennen stellt sich die gezielte und rasche Bereitstellung von Nährstoffen für die Kulturen dar, so daß zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung des Nährstoffangebotes ergriffen werden müssen. In den ersten Jahren nach Umstellung auf eine feuerlose Nutzung wird der Einsatz mineralischer Düngemittel unabdingbar sein. Besonders deutlich war der durch Immobilisierung verursachte Mangel an extrahierbarem Phosphor im Boden, verursacht durch das hohe C:P-Verhältnis des Mulchmaterials. Langfristig, d.h. über einen Zeitraum von mehreren Jahren dürfte im Anbau ohne Brennen die Bedeutung mikrobieller und organischer Verbindungen als Nachlieferungsquelle von Nährstoffen zunehmen, wodurch die Düngergaben gesenkt werden könnten.

Unter den genannten Voraussetzungen stellt der Anbau ohne Brennen eine überaus interessante Alternative zum traditionellen Anbau dar. Fraglich bleibt jedoch die Umsetzung in die Praxis.

Letztenendes steht und fällt das Konzept einer nachhaltigen Bewirtschaftung mit der Erfahrung und der Sensibilität desjenigen, der die Landwirtschaft betreibt, also in diesem Fall des Kleinbauern. Dieser verfügt oftmals über recht genaue Kenntnisse des Zustandes und Ertragspotentials seiner Böden, wobei er sich vor allem daran orientiert, wie hoch die Erträge von Mais und Maniok bei einer vormaligen Bewirtschaftung waren sowie an dem aktuellen Zustand der Brachevegetation. Ob es jemals zu einer praxisnahen Verwertung dieser Art von Untersuchungsergebnissen kommt, hängt vor allem davon ab, ob es möglich ist, mit einfachen Mitteln, d.h. auf der Grundlage einiger weniger "Schlüsselparameter", Aussagen über die potentielle Produktivität einer zu bewirtschaftenden Fläche zu machen. Daß dies möglich sein könnte, haben die vorliegenden Untersuchungen gezeigt. Eine Umsetzung des Wissens um Indikatoren für die nachhaltige Bodenproduktivität landwirtschaftlich genutzter Flächen in der Praxis kann jedoch nur erfolgreich sein, wenn sie vor dem Erfahrungshintergrund des Bauern stattfindet.

VI Zusammenfassung

Shifting cultivation ist in weiten Teilen der Tropen die vorherrschende Anbauform der Kleinbauern. Es ist durch aufeinanderfolgende Anbau- und Brachephasen mit ab- bzw. zunehmender Bodenproduktivität charakterisiert. Bei der Ursachenforschung für die Veränderung der Bodenproduktivität standen bodenbiologische Parameter bisher nur im Hintergrund.

Zielsetzung der vorliegende Arbeit war die Untersuchung biologischer und chemischer Bodencharakteristika im traditionellen Anbausystem. Diese wurden in Bezug zur landwirtschaftlichen Produktion und der Intensität der Landnutzung gesetzt, was als Basis zur Beurteilung agronomischer Eingriffe sowie verschiedener Anbausystemen diente.

Im Vordergrund der Untersuchungen standen folgende Aspekte: (a) die Bedeutung und Funktion der Brachephase bzw. der Sekundärvegetation als Bestandteil des Nutzungssystems hinsichtlich dessen nachhaltiger Produktivität, (b) die Ursachen für den Rückgang der Bodenproduktivität während der Anbauphase und (c) Eingriffe in die Kulturtechnik zur Verhinderung des Rückganges der Bodenproduktivität.

Die Versuchsstandorte lagen schwerpunktmäßig im Munizip Igarapé-Açu (ca. 110 km östlich von Belém) sowie in Iracema (ca. 20 km nördlich von Castanhal) in der 'Zona Bragantina' im Osten des Amazonasgebietes Brasiliens. Die Region ist wird seit mehreren Jahrzehnten landwirtschaftlich genutzt. In dem kleinbäuerlichen Anbausystem der örtlichen Subsistenzwirtschaft dient die spontan aufwachsende Sekundärvegetation als Brachevegetation. Die Dauer der Brachephase hängt mehr und mehr vom Flächenbedarf des Kleinbauern ab - sie lag zum Zeitpunkt der Untersuchungen zwischen 4 und 10 Jahren. Die Dauer der Anbauphase beträgt im allgemeinen zwei Jahre. Es werden vor allem Mais, Reis, Bohnen und Maniok angebaut.

Zur Untersuchung der Brachephase wurden die Veränderungen biologischer und chemischer Bodenparameter in Abhängigkeit vom Brachealter mit Hilfe der Methode der „falschen Zeitreihe“ erfaßt. Zielsetzung war es, zu prüfen, ob sich diese Parameter als Indikatoren für die nachhaltige Produktivität von Nutzungssystemen eignen.

Zur Untersuchung der traditionellen Anbauphase sowie modifizierter Anbausysteme wurden zwei Feldversuche in Igarapé-Açu angelegt, von denen einer in einer anderen Region (Iracema) wiederholt wurde. Zur Erfassung der Veränderung der Bodenparameter im Verlauf der Anbauphase wurden Bodenprobenahmen entsprechend der landwirtschaftlichen Aktivitäten (z.B. Aussaat und Ernte der Kulturpflanzen) durchgeführt. Zum Zeitpunkt des Überganges von der Anbau- zur Brachephase wurde der Effekt der Anbauphase bilanziert. Die

Untersuchung modifizierter Anbausysteme umfaßte den Anbau ohne Brennen, Anbau mit Integration von Leguminosen in die Fruchtfolge (*Vigna*) bzw. als Untersaat/ Bodendecker (*Canavalia*), Anbau mit erhöhtem Düngungsniveau (NPK und Rohphosphat), Anbau mit verschiedenen Verfahren der Bodenbearbeitung (Stockrodung, Pflügen) und semipermanente Anbausysteme (Pfeffer, Passionsfrucht, Papaya).

Die Bodenprobenahme erfolgte i.a. in den Tiefenstufen 0-10 und 10-20 cm. Die Analyse erfolgte auf den gravimetrischen Wassergehalt, pH (CaCl₂, H₂O), austauschbare basische Kationen (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), austauschbares Al³⁺ und H⁺, austauschbares anorganisches Phosphor, Gesamt-Kohlenstoff, -Stickstoff und -Phosphor, mikrobiellen Biomasse-Kohlenstoff und -Phosphor, mikrobielle Respiration, saure Phosphatase, Urease und β -Glucosidase. Einige Bodenproben wurden zusätzlich auf organischen Phosphor, basische Phosphatase, Dehydrogenase, Aryl-Sulfatase, Cellulase, Nitrat und Ammonium analysiert. Zur statistischen Datenanalyse wurden neben herkömmlichen Methoden multivariate Verfahren eingesetzt (Faktorenanalyse, Diskriminanzanalyse).

Die Ergebnisse aus der Untersuchung der Brachephase zeigten eine deutliche Abhängigkeit der meisten Bodencharakteristika vom Alter der Brache. Der Verlauf der Brachephase zeichnet sich durch die folgenden Veränderungen im Oberboden aus: Zunahme der Bodenazidität (pH, Al³⁺, H⁺), Zunahme der Gehalte an mikrobiellem Biomasse-C und -P (sowie deren relativer Bedeutung gegenüber C_{org} bzw. P_i), Anstieg der Aktivität der sauren und basischen Phosphatase und der Urease, Zunahme der mikrobiellen Respiration, Anstieg der Gehalte an C_{org}, N_t und P_t (jedoch erst in Brachen von ca. 20 Jahren und älter), Abnahme der Konzentration basischer Kationen sowie extrahierbaren anorganischen Phosphors. Dabei ist die Abhängigkeit der enzymatischen Aktivitäten vom Brachealter ausgesprochen hoch, die des organischen Kohlenstoffs und Gesamt-Stickstoffs dagegen gering. Darüber hinaus wurde mit zunehmender Brachedauer eine Konzentrierung mikrobieller Aktivitäten und Kompartimente in Richtung auf die Bodenoberfläche beobachtet (saure Phosphatase, C_{mik}, P_{mik}).

Die vorrangige Bedeutung der Brachevegetation als Bestandteil des traditionellen Anbausystems wird in der Einbindungen von Bioelementen in organische und mikrobielle Pools im Boden und der Vegetation gesehen. Was den methodischen Ansatz anbelangt, wird deutlich, daß der Boden der Brache nur in sehr eingeschränktem Maß als Vergleichsbasis für die Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Anbausystemen dienen kann. Der Grund ist, daß einige Effekte der Brachephase in scheinbarem Widerspruch zur nachhaltigen Bodenproduktivität stehen (Versauerung, Rückgang basischer Kationen). Diese Prozesse können nur umfassend beurteilt werden, wenn man Charakteristika der Vegetation in die Betrachtung einbezieht.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung der Anbauphase zeigen, daß das Brennen der Brachevegetation zu einer nachhaltigen Veränderung der meisten Bodencharakteristika führt. Es kommt zum Anstieg des $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ um ca. eine Einheit, zur Zunahme der Konzentration basischer Kationen (Kalium, Calcium, Basensättigung) sowie extrahierbaren Phosphors, zur Abnahme der H^+ -Konzentration und zum Rückgang enzymatischer Aktivitäten (Phosphatasen, Ureasen) und der bodenmikrobiellen Respiration. Selbst zu Beginn der Sukzession der Brachevegetation (8 Monate nach dem Brennen) zeigt sich ein deutlicher Effekt des Brennens auf die Bodeneigenschaften gegenüber der gleichzeitig untersuchten Ausgangsvegetation.

Was den methodischen Ansatz der Untersuchungen des zeitlichen Verlaufes der enzymatischen Aktivitäten anbelangt, so ist es für die Interpretation der gewonnenen Daten hilfreich, die Ergebnisse mit einer Referenzfläche, z.B. einer Sekundärvegetation, zu vergleichen.

Bei der Untersuchung modifizierter Anbausysteme zeigte der Verzicht auf das Brennen - verglichen mit dem traditionellen Anbau - die nachhaltigste Reduzierung des Anbaueffektes auf die Bodencharakteristika. Es kam zu einem positiven Effekt auf die bodenmikrobiellen Aktivitäten und Nährstoffpools. Es wird aber auch deutlich, daß es gerade vor dem Hintergrund der nachhaltigen Produktivität unabdingbar ist, Kenntnisse über die Ausgangsbedingungen vor der Inkulturnahme einer Fläche zu besitzen. So hatte der Verzicht auf das Brennen an den zwei Versuchsstandorten einen gegensätzlichen Effekt auf den Maisertrag zur Folge. In Cumarú stieg der Maisertrag gegenüber dem traditionellen Anbau an, in Iracema nahm er ab. Ursache war ein niedriger pH-Wert und geringe Nährstoffkonzentrationen (Ca , P_i) in Iracema; zudem wurde austauschbares Aluminium nachgewiesen. Zu einer Phosphor-Immobilisierung im Boden kam es an beiden Standorten durch die großen Mengen organischen Materials (weites C:P-Verhältnis), so daß vor allem auf schwach versorgten Böden eine zusätzliche P-Düngung erforderlich ist. Unter den genannten Voraussetzungen ist der Anbau ohne Brennen eine überaus interessante Alternative zum traditionellen Anbau.

Die Integration von Leguminosen in die Fruchtfolge zeigte keine deutlichen Effekte auf die Bodeneigenschaften. Im Anbau mit *Canavalia ensiformis* wurde ein Anstieg des Gesamtkohlenstoffs und -Stickstoffs beobachtet. Darüber hinaus kam es zu einer hohen Kaliumaufnahme durch den Bodendecker, was als Beitrag zum Erhalt des Kaliums im System gewertet wird (Verhinderung der Verlagerung in nicht durchwurzelbare Bodentiefen). Da es jedoch zu Mindererträgen bei Maniok kam, empfiehlt sich ein Ausgleich des Kaliumentzuges durch die Untersaat über zusätzliche Düngergaben.

Das semipermanente Anbausystem (Pfeffer, Maracuja, Papaya) zeichnet sich gegenüber dem traditionellen Anbau durch einen um ca. 0,5 pH-Einheiten geringeren pH, einen geringeren C_{org} -Gehalt, niedrige Calcium- und Magnesiumgehalte, geringere enzymatische Aktivitäten und eine eventuell auftretende höhere Al^{3+} -Konzentration aus. Es scheint, daß dieses Nutzungssystem in eine Degradationsspirale eintreten könnte.

Mit Hilfe eines multivariaten Ansatzes (Diskriminanzanalyse) konnte der Zeitreihencharakter der einzelnen Anbauphasen visualisiert werden, der - in einem zweiten Schritt - als Basis für die Beurteilung der nachhaltigen Produktivität modifizierter Anbausysteme diente. Dabei wies das Anbausystem ohne Brennen eine geringere Distanz (quadrierte Mahalanobis-Distanz) zur Brachephase auf als der traditionelle Anbau. Dies deutet darauf hin, daß die nachhaltige Produktivität während der Anbauphase weniger stark absinkt, so daß im Anbau ohne Brennen die Brachedauer gegenüber dem traditionellen Anbau verkürzt werden könnte.

Mit Hilfe einer schrittweisen Modellrechnung wurde demonstriert, daß eine Diskriminierung der verschiedenen Anbauphasen und -systeme auch unter Reduzierung der Anzahl einbezogener Parameter ('saure Phosphatase' und 'pH(CaCl₂)') möglich ist. Es scheint, daß auf diesem Wege eine Beurteilung der nachhaltigen Produktivität von Nutzungssystemen mit relativ geringem Aufwand hinsichtlich Bodenprobenahme und -analyse möglich ist.

Summary

In most parts of the tropics shifting cultivation is the predominant cropping system of the small scale farmer. It is characterized by subsequent phases of cropping and fallow with declining and increasing soil productivity, respectively. So far only a few soil biological parameters have been included in research work which aimed at giving explanations for the change in soil fertility status.

The aim of the present scientific work was to study biological and chemical soil characteristics of the traditional land-use system which were linked with crop production and intensity of land-use as a basis for evaluation of management practices and different cropping systems.

The principal issues of the study were a) the role and function of the fallow period and its secondary vegetation as part of the land-use system with respect to sustainable productivity, b) the causes for the decline of soil productivity during the cropping phase and c) management practices to avoid the decline of the sustainable productivity of the land-use system.

The experimental sites were located in the municipality of Igarapé-Açu (ca. 110 km east of Belém) and in Iracema (ca. 20 km north of Castanhal) in the 'Zona Bragantina' in the eastern Amazon, Brazil. The region has been under agricultural use since several decades. In the smallholders' cropping system the spontaneous regrowth of secondary vegetation ('capoeira') serves as fallow vegetation. The length of the fallow period depends more and more on how much space the farmer needs for his crops - during the period of field-work it ranged between 4 and 10 years. The cropping phase lasts generally about 2 years, and most common crops are maize, rice, beans (cowpea) and cassava.

During the fallow phase, the changes of soil biological and chemical parameters have been recorded in relation to the fallow age by means of an unreal time-series. The aim was to evaluate which parameters could serve as indicators for the sustainable productivity of land-use systems.

For the study of the traditional and modified cropping systems two field trial were installed at Igarapé-Açu one of which was repeated in a different location, at Iracema. In order to study the changes of soil properties during the cropping period soil samples were taken corresponding with agronomic activities (e.g. sowing, harvest). At the transition from cropping to fallow the cropping effect was evaluated. The investigation of modified cropping systems comprised cropping without burning of the fallow vegetation, with integration of legumes into the sequence of cropping (*Vigna*) and as life-mulch/cover crop (*Canavalia*), cropping with a higher fertilizer input (NPK and rock-phosphate), with different techniques of land-preparation (clearing of trunks, ploughing) and semi-permanent cropping systems (black pepper, passion fruit, pawpaw).

Soil samples were generally taken in 0-10 and 10-20 cm of soil depth. They were analyzed for gravimetric soil moisture content, pH (CaCl₂, H₂O), exchangeable basic cations (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), exchangeable Al³⁺ and H⁺, extractable inorganic phosphorus, total organic carbon, nitrogen and phosphorus, microbial biomass carbon and phosphorus, microbial respiration, acid phosphatase, urease and β -glucosidase. Some samples were additionally analyzed for organic phosphorus, alkaline phosphatase, dehydrogenase, aryl-sulfatase, cellulase, nitrate and ammonium. For the statistical analysis of data, common procedures as well as multivariate methods were used (factor analysis, discriminant analysis).

The results of the study of the fallow phase showed a clear dependence of most of the soil characteristics upon the fallow age. In the course of the fallow period the following changes have been observed: increase of soil acidity (pH, Al³⁺, H⁺), increase of soil microbial biomass carbon and phosphorus (C_{mik}, P_{mik}, and their relative importance compared with C_{org} and P₁, respectively), increase of the activity of the acid and basic phosphatase and urease, increase of soil microbial respiration, increase of the concentration of soil organic carbon (C_{org}), total nitrogen (N_t) and total phosphorus (P_t) (but only in 20 year-old fallow sites and older), decline of the concentration of basic cations and extractable phosphorus. The significance of correlation between fallow age and enzymatic activities was extremely high, between fallow age and C_{org} and N_t it was low. In addition it was observed that with increasing fallow age a concentration of microbial activities in the direction of the soil surface took place (acid phosphatase, C_{mik}, P_{mik}).

The fixation of bioelements in organic and microbial pools in the soil and the vegetation is considered the principal role of the fallow vegetation as a component of the cropping system. As far as the methodological approach is concerned it becomes clear that the soil of the fallow system could not serve as a comparative basis for the evaluation of agronomic management practices and land-use systems. The reason for this is that some effects of the fallow period seem to be contrary to the sustainable productivity of the soil (acidification, decrease of basic cations). They can only be interpreted when including the characteristics of the vegetation.

The results of the study of the cropping period showed that the traditional cropping system with burning of the fallow vegetation leads to an enduring change of most of the soil properties. An increase was measured of the pH(CaCl₂) value by one unit, of the concentration of basic cations (potassium, calcium, saturation of bases) and of extractable phosphorus, a decline of the H⁺-concentration, of enzymatic activities (phosphatases, ureases) and of soil microbial respiration. Even at the beginning of the succession of the fallow vegetation (8 months after burning) a distinct effect of burning on soil characteristics was observed.

As far as the methodological approach for the study of the temporal course of the enzymatic activities is concerned it is helpful for the interpretation of the data to compare the results with a reference, e.g. a secondary vegetation.

In the study of modified land-use systems, cropping without burning showed the clearest reduction of impact of cropping on soil characteristics compared to the traditional cropping system. It had a positive effect on soil microbial activities and pools of nutrients. But it also became evident that it is necessary to have good knowledge about the local pedological conditions before land preparation and planting. This is demonstrated by the contradictory effect of non-burning on maize yield at the two experimental sites. In Cumarú the yield of maize increased compared with the traditional cropping system, in Iracema it declined, caused by low pH values and low concentrations of nutrients (Ca, P_i). Besides this traces of extractable aluminium were found. At both sites an immobilization of phosphorus was observed, due to high amounts of organic material (wide C:P ratio) covering the soil surface. As a consequence soils with a low nutritional level need an additional P-input by fertilizer application. When fertilizers are used, cropping without burning is an extremely interesting alternative to the traditional cropping system.

The integration of legumes into the sequence of cropping did not show a clear effect on soil properties. In the life-mulch system with *Canavalia ensiformis* an increase of soil organic carbon and total nitrogen was observed at the Cumarú site. Besides this, a high potassium uptake by the cover crop was observed and interpreted as a contribution to conserve potassium in the system (prevention of leaching into deeper soil depths). As a consequence of the low potassium content in the upper soil layer the yield of cassava declined so that a compensation by fertilizer input is recommended.

The semi-permanent land-use systems are characterized by lower pH values (-0,5 units), lower content of C_{org}, calcium and magnesium, lower enzymatic activities and eventually higher concentrations of aluminium cations compared with the traditional cropping system. It seems that this kind of system easily enters into a degradation spiral.

By means of a multivariate statistical approach (discriminant analysis) the cyclical time series character of the various phases of the cropping system was visualized and - in a second step - used as a basis for the interpretation of modified cropping systems with regard to sustainable productivity. In this figure the cropping system without burning was less distant (squared Mahalanobis distance) to the fallow phase than the traditional cropping system. This means that during the cropping system without burning the sustainable productivity declines less which would make it possible to shorten the length of the fallow phase.

With a stepwise modeling it was demonstrated that a discrimination between different cropping phases and -systems is even possible when reducing the number of included parameters ('acid phosphatase' and 'pH(CaCl₂)'). It seems that by keeping track of these to parameters interpretation of the sustainable productivity of land-use systems is possible with low expenses with regard to soil sampling and analyses.

Resumo

Em muitas partes dos trópicos ‘derruba e queima’ (shifting cultivation) é o sistema de plantio mais dominante do pequeno produtor. Ele é caracterizado por fases de plantio e de pousio com a produtividade do solo oscilando, respectivamente. Até o momento, poucos parâmetros biológicos foram incluídos em estudos que tentam dar explicações às mudanças do estado da fertilidade do solo.

O objetivo do presente trabalho foi de estudar as características biológicas e químicas do solo. As propriedades do solo foram relacionadas com a produção agrícola e a intensidade do uso da terra e serviram como base para a interpretação de atividades de manejo e de diferentes sistemas de plantio.

As principais questões abordadas foram: a) o papel e a função da fase de pousio e da vegetação secundária como parte do sistema de uso da terra com respeito à sustentabilidade produtiva; b) as causas da baixa produtividade do solo durante a fase de plantio; e c) as práticas de manejo para evitar a queda da sustentabilidade produtiva do sistema de uso da terra.

As áreas experimentais estão localizadas no Município de Igarapé-Açu (ca. 110 km à leste de Belém) e em Iracema (ca. 20 km ao norte de Castanhal) na ‘Zona Bragantina’ na parte Oriental da Amazônia, Brasil. A região se encontra sob uso agrícola há várias décadas. No sistema de produção do pequeno produtor, a vegetação secundária que regenera espontaneamente (‘capoeira’) serve como vegetação de pousio. A duração do período de pousio depende cada vez mais de quanto de espaço o produtor precisa para as próprias culturas, durante o período de cultivo, e o pousio normalmente pode durar de 4 a 10 anos. Em geral a fase de plantio demora 2 anos. As culturas as mais comuns são milho, arroz, feijão (caupi) e mandioca.

Durante o estudo da fase de pousio as mudanças dos parâmetros biológicos e químicos foram reportados em relação à idade do pousio através da metodologia de uma cronosequência irreal. O objetivo foi de avaliar que parâmetros poderiam servir como indicadores para a sustentabilidade produtiva dos sistemas de uso da terra.

Para a avaliação dos sistemas de produção tradicional e modificados foram instalados dois experimentos de campo em Igarapé-Açu, um dos quais foi repetido numa região diferente (Iracema). Para estudar as mudanças das propriedades do solo durante o período de plantio foram tiradas amostras de solo em função das atividades agrícolas (e.g., plantio, colheita). No período de transição do cultivo para o pousio foi avaliado o efeito do plantio. Para o estudo de sistemas de produção modificados compreendeu o sistema de plantio sem queima, com integração das leguminosas na sequência de plantio (*Vigna*) e como cobertura viva (*Canavalia*

ensiformis), com adubação elevada (NPK e fosfato de rocha), com diferentes formas de preparo de área (destoca, aragem) e sistemas de produção semi-permanentes (pimenta do reino, maracujá, mamão).

Amostras de solo foram tiradas geralmente entre 0-10 e 10-20 cm de profundidade. Essas foram analisadas quanto à humidade gravimétrica, pH (CaCl₂, H₂O), cátions básicos trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), Al³⁺ e H⁺ trocáveis, fósforo inorgânico assimilável/trocável, carbono orgânico total, nitrogênio e fósforo total, carbono e fósforo na biomassa microbiana, respiração microbiana do solo, fosfatase ácida, urease and β -glicosidase. Algumas amostras foram analisadas adicionalmente para fósforo orgânico, fosfatase básica, desidrogenase, aryl-sulfatase, celulase, nitrato and amônio. Para a análise estatística dos dados foram utilizados procedimentos comuns e análise multivariada (análise de fatores, análise de discriminação).

Os resultados do estudo da fase de pousio mostraram uma dependência clara da maioria das características do solo da idade do pousio. No decurso do período de pousio foram observadas as seguintes mudanças: aumento da acidez do solo (pH, Al³⁺, H⁺), aumento do carbono e fósforo da biomassa microbiana (C_{mik}, P_{mik}, e a importância relativa dos mesmos comparada com C_{org} e P_i, respectivamente), aumento da atividade da fosfatase ácida e básica e da urease, aumento da respiração microbiana do solo, aumento da concentração do carbono orgânico do solo (C_{org}), do nitrogênio total (N_t) e do fósforo total (P_t, mas apenas em áreas de pousio de 20 anos de idade ou mais antigos), declínio na concentração de cátions básicos e de fósforo trocável. A significância da correlação entre a idade de pousio e as atividades enzimáticas foram extremamente altas, enquanto que para a idade de pousio e C_{org} e N_t essas correlações foram baixas. Além disso, foi observado que com a idade do pousio as concentrações das atividades microbianas aumentaram na direção da superfície do solo (fosfatase ácida, C_{mik}, P_{mik}).

A fixação de bioelementos em „pools“ orgânicos e microbianos no solo e na vegetação é considerada o principal papel da vegetação de pousio como componente do sistema de plantio. Quanto à abordagem metodológica torna-se evidente que o solo do sistema de pousio não poderia servir como base comparativa para uma avaliação de práticas agrícolas de manejo e de sistemas de uso da terra. A razão é que alguns efeitos do período de pousio parecem ser contraditórios à sustentabilidade produtiva do solo (acidez, baixa da concentração dos cátions básicos), e que somente podem ser interpretados quando incluídas as características da vegetação.

Os resultados do estudo do período de plantio mostraram que o sistema tradicional com queima leva a uma mudança persistente da maioria das propriedades do solo. Foi observado um aumento do pH(CaCl₂) de uma unidade, da concentração dos cátions básicos (potássio, cálcio, saturação básica) e do fósforo assimilável, enquanto houve um declínio na concentração do H⁺, da atividade enzimática (fosfatase ácida) e da respiração microbiana do

solo. Mesmo no início da sucessão da vegetação secundária (8 meses após a queima), foi observado um efeito distinto da queima nas características do solo. Quanto à abordagem metodológica do estudo no decurso temporal das atividades enzimáticas é muito importante para a interpretação dos dados, comparar os resultados com uma área de referência, como por exemplo uma vegetação secundária.

No estudo de sistemas de uso da terra modificados, o sistema de plantio sem queima mostrou uma redução bem clara do impacto do plantio, nas características do solo comparado ao sistema de plantio tradicional. Houve um efeito positivo nas atividades microbianas do solo e nos „pools“ de nutrientes. Mas também tornou-se evidente que é necessário ter bons conhecimentos sobre as condições pedológicas locais antes do preparo da área e do plantio. Isto foi demonstrado pelo efeito contraditório de não-queima na produção de milho nas duas áreas experimentais. Em Cumarú a produção do milho aumentou comparado ao sistema de plantio tradicional, enquanto que em Iracema foi mais baixa, que deve estar associados aos baixos valores de pH e das concentrações de nutrientes (Ca, P_i). Além disso, foram observados traços de alumínio trocável. Em ambas áreas foram observados uma imobilização de fósforo devido à altas quantidades de matéria orgânica (alto C:P) cobrindo o solo. Consequentemente solos com um nível baixo de nutrientes necessitam de uma dose adicional de fósforo através de adubação. Quando adubos são usados o sistema de plantio sem queima representa uma alternativa extremamente interessante em comparação com o sistema de plantio tradicional.

A integração de leguminosas na sequência de plantio não demonstrou um efeito distinto nas propriedades do solo. No sistema com cobertura viva (*Canavalia ensiformis*), foi observado um aumento da matéria orgânica e do nitrogênio total do solo na área de Cumarú. Além disso, foi observado também uma alta assimilação de potássio pela planta de cobertura e foi interpretado como uma contribuição na conservação de potássio no sistema (prevenção de lixiviação em camadas mais profundas). Como consequência do baixo conteúdo de potássio na camada superficial do solo, a produção de mandioca diminui a ponto de ser recomendado uma compensação pela aplicação de fertilizantes.

Os sistemas de plantio semi-permanentes são caracterizados por valores baixos do pH (-0,5 unidades), do conteúdo da matéria orgânica (C_{org}), do cálcio e do magnésio, das atividades enzimáticas e eventualmente de altas concentrações de cátions de alumínio comparado aos sistemas de plantio tradicional. Aparentemente, este tipo de sistema entra facilmente numa espiral do processo de degradação.

Através da análise estatística multivariada (análise de discriminação) foi observado o caráter de série temporal de várias fases do sistema de plantio tradicional e, num segundo passo, utilizado como base para a interpretação de sistemas modificados com relação à sustentabilidade produtiva. Na figura, o sistema de plantio sem queima se encontra menos

distante (distância quadrada de Mahalanobis) da fase de pousio, em comparação com o sistema de plantio tradicional. Isto significa que durante o sistema de plantio sem queima a sustentabilidade produtiva diminui, o que possibilitaria reduzir a duração da fase de pousio.

Com uma modelagem (passo-a-passo) foi demonstrado que é possível discriminar entre diferentes fases de plantio e sistemas de plantio, mesmo quando se reduz o número de parâmetros incluídos ('fosfatase ácida' e 'pH(CaCl₂)'). Esses resultados evidenciam que é possível a avaliar sistemas de uso da terra com respeito à sustentabilidade produtiva a custos relativamente baixos quanto à amostragem e a análise de solos.

VII Literatur

- Adams, M.A., J. Iser, A.D. Keleher, D.C. Cheal (1994) Nitrogen and phosphorus availability and the role of fire in heathlands at wilsons promontory. *Australian Journal of Botany* **42**(3), 269-281.
- Ahn, P.M. (1979) The Optimum Length Of Planned Fallows. In: Mongi, H.O., Huxley, P.A.: *Soil Research in Agroforestry (Proc. of an Expert Consulting held at the International Council for Research in Agroforestry in Nairobi, March 26-30, 1979)*, ICRAF, Nairobi, 15-39.
- Alef, K. (1991) *Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie: Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung*. ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg /Lech, 284 Seiten.
- Alvarez, R., O.J. Santanatoglia, P.E. Daniel, R.García (1995) Respiration and specific activity of soil microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Pesq. agropec. bras.* **30**(5), 701-709.
- Alvarez, R., O.J. Santanatoglia, R. Garcia (1995) Effect of temperature on soil microbial biomass and its metabolic quotient in situ under different tillage systems. *Biology and Fertility of Soils* **19**(2-3), 227-230.
- Amato, M., J.N. Ladd (1988) Assay for Microbial Biomass on Ninhydrin-Reactive Nitrogen in Extracts of Fumigated Soils. *Soil Biology and Biochemistry* **20**(1), 107-114.
- Anderson, J.P.E., Domsch, K.H. (1978) A Physiological Method for the Quantitative Measurement of Microbial Biomass in Soils. *Soil Biology & Biochemistry* **10**, 215-221.
- Anderson, T.-H., K.H. Domsch (1989) Ratios of Microbial Biomass Carbon to Total Organic Carbon in Arable Soils. *Soil Biology & Biochemistry* **21**(4), 471-479.
- Anderson, T.H., K.H. Domsch (1990) Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology & Biochemistry* **22**(2), 251-255.

- Andriessse, J.P. , T.T. Koopmans (1984) A Monitoring Study on Nutrient Cycles in Soils Used for Shifting Cultivation Under Various Climatic Conditions in Tropical Asia. I. The Influence of Simulated Burning on Form and Availability of Plant Nutrients. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **12**, 1-16.
- Andriessse, J.P., R.M. Schelhaas (1987) Monitoring Study of Nutrient Cycles in Soils Used for Shifting Cultivation Under Various Climatic Conditions in Tropical Asia. III. The Effects of Land Clearing Through Burning on Fertility Level. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **19**, 311-332.
- Arevalo, J.R., J.A. Carreira, F.X. Niell (1993) Kinetic parameters of phosphatase activity along a xeric dolomitic soil chronosequence related to wildfires. *Geomicrobiology Journal* **11** (3-4), 235-245.
- Aweto, A.O. (1981) Secondary Succession and Soil Fertility Restoration in South-Western Nigeria. II. Soil Fertility Restoration. *Journal of Ecology* **69**, 609-614.
- Aweto, A.O. (1988) Effects of Shifting Cultivation on a Tropical Rain Forest Soil in Southwestern Nigeria. *Turrialba* **38**(1), 19-22.
- Ayanaba, A., S.B. Tuckwell, D.S. Jenkinson (1976) The Effect of Clearing and Cropping on the Organic Reserves and Biomass of Tropical Forest Soils. *Soil Biology & Biochemistry* **8**, 519-525.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, R. Weiber (1996) *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 8. Auflage, Springer, Berlin.
- Bardgett, R.D., D.K. Leemans (1995) The short term effects of cessation of fertiliser applications, liming, and grazing on microbial biomass and activity in a reseeded upland grassland soil. *Biology and Fertility of Soils* **19**(2-3), 148-154.
- Bolton, H. Jr., L.F. Elliott, R.I. Papendick, D.F. Bezdicek (1985) Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices. *Soil Biology & Biochemistry* **17**(3), 297-302.
- Bonde, T.A., T. Rosswall, R.L. Victoria (1991) The Dynamics of Soil Organic Matter and Microbial Biomass Following Clearfelling and Cropping of a Tropical Rainforest Soil in the Central Amazon. In: Bonde, T.A.: *Size and Dynamics of Active Soil Organic Matter Fraction as Influenced by Soil Management*, Linköping Studies in Arts and Science **63**, Linköping. (VII)

- Brinkmann, W.L.F., J.C. De Nascimento (1973) The Effect of Slash and Burn Agriculture on Plant Nutrients in the Tertiary Region of Central Amazonia. *Turrialba* **23**(3), 2284-290.
- Brookes P.C., D.S. Powlson, D.S. Jenkinson (1982) Measurement of microbial phosphorus in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **14**, 319-329.
- Brookes P.C., D.S. Powlson, D.S. Jenkinson (1984) Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, **16**, 169-175.
- Brown, S., Lugo, A.E. (1990) Effects of Forest Clearing and Succession on the Carbon and Nitrogen Content of Soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant and Soil* **124**, 53-64.
- Carreira, J.A., F.X. Niell (1995) Mobilization of nutrients by fire in a semiarid gorse-scrubland ecosystem of southern Spain. *Arid Soil Research and Rehabilitation* **9**(1), 73-89.
- Ceccanti, B., B. Pezzarossa, F.J. Gallardolancho, G. Masciandaro (1993) Biotests as markers of soil utilization and fertility. *Geomicrobiology Journal* **11**(3-4), 309-316
- Cerri, C.C., B. Volkoff, F. Andreux (1991) Nature and Behaviour of Organic Matter in Soils Under Natural Forest, and After Deforestation, Burning and Cultivation, near Manaus. *Forest Ecology and Management* **38**, 247-257.
- Chidumayo, E.N. (1987) A Shifting Cultivation Land Use System Under Poulation Pressure in Zambia. *Agroforestry Systems* **5**, 15-25.
- Cooper, P.J.M. (1972) Aryl sulphatase activity in Northern Nigerian soils. *Soil Biologie & Biochemistry* **4**, 333-337.
- Deng, S.P., M.A. Tabatabai (1996) Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils. II. Glycosidases. *Biology and Fertilty of Soils* **22**, 208-213.
- Denich, M. (1989) Untersuchungen zur Bedeutung junger Sekundärvegetation für die Nutzungssystemproduktivität im östlichen Amazonasgebiet, Brasilien. *Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen*, Heft **46**.
- Denich, M., U. Diekmann, M.S.A. Kato, O.R. Kato (1993) Effects of land preparation, agricultural activities and the application of nutrients on the regeneration of fallow vegetation and soil properties: Methodologies. In: 1. Workshop SHIFT. Belém, março de 1993. Resumos. CNPq, IBAMA, BMFT, Geesthacht, 152-153.

- Denich, M., M.S.A. Kato (1993) Capoeira: Secondary vegetation as an integral part of the agricultural production system. In: 1. Workshop SHIFT. Belém, março de 1993. Resumos. CNPq, IBAMA, BMFT, Geesthacht, 165-167.
- Dick, W.A. (1984) Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal* **48**, 569-574.
- Dick, R.P. (1992) A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **40**, 25-36.
- Diaz-Raviña, M., M.J. Acea, T. Carballas (1993) Microbial biomass and its contribution to nutrient concentrations in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* **25**(1), 25-31.
- Diez, J.A., A. Polo, C.C. Cerri, F. Andreux (1991) Influence of Fallow and of Pasture on the Nutrient Dynamics in Recently Deforested Oxisols of Eastern Amazonia. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* **26**(1), 77-83.
- Domsch, K.H., Th. Beck, J.P.E. Anderson, B. Söderström, D. Parkinson, G. Trolldenier (1979) A comparison of methods for soil microbial population and biomass studies. *Z. Pflanzenernährung Bodenkunde* **142**, 520-533.
- Doran, J.W. (1987) Microbial biomass and mineralizable nitrogen distributions in no-tillage and plowed soils. *Biology and Fertility of Soils* **5**, 68-75.
- Duxbury, J.M., R.L. Tate III. (1981) The Effect of Soil Depth and Crop Cover on Enzymatic Activities in Pahokee Muck. *Soil Science Society of America Journal* **45**, 322-328.
- Eivazi, F., M.A. Tabatabai (1977) Phosphatases in soils. *Soil Biology and Biochemistry* **9**, 167-172.
- Eivazi, F., M.A. Tabatabai (1988) Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry* **20**(5), 601-606.
- Ernst, J.W., H.F. Massey (1960) The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Science Society of America Proceedings* **24**, 87-90.
- Ewel, J.J., M.J. Mazzarino, C.W. Berish (1991) Tropical Soil Fertility Changes Under Monocultures and Successional Communities of Different Structure. *Ecological Applications*, **1**(3), 289-302.
- FAOSTAT (1997) FAO Database Gateway. Internet-Adresse: <http://apps.fao.org/lim500/nph-wrap.pl?LandUse&Domain=LUI>

- Feigl, B.J., G.P. Sparling, D.J. Ross, C.C. Cerri (1995) Soil microbial biomass in Amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool size. *Soil Biology and Biochemistry* **27** (11), 1467-1472.
- Feller, C., E. Frossard, M. Brossard (1994) Phosphatase Activity in Low Activity Tropical Clay Soils - Distribution in the Various Particle Size Fractions *Canadian Journal of Soil Science* **74** (2), 121-129.
- Fenn, L.B., J.L. Tipton, G. Tatum (1992) Urease activity in two cultivated and non-cultivated arid soils. *Biology and Fertility of Soils* **13**, 152-154.
- Frankenberger, W.T., W.A. Jr, Dick (1983) Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal* **47**, 945-951.
- Fraser, D.G., J.W. Doran, W.W. Sahs, G.W. Lesoing (1988) Soil Microbial Populations and Activities under Conventional and Organic Management. *Journal of Environmental Quality* **17**(4), 585-590.
- Gallardo, A., W.H. Schlesinger (1994) Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biology & Biochemistry* **26**(10), 1409-1415.
- Greenland, D.J., P.H. Nye (1959) Increases in the Carbon and Nitrogen Contents of Tropical Soils Under Natural Fallows. *Journal of Soil Science*, **10**(2), 284-299.
- Gregorich, E.G., R.P. Voroney, R.G. Kachanoski (1991) Turnover of Carbon Through the Microbial Biomass in Soils with Different Textures. *Soil Biology & Biochemistry* **23**(8), 799-805.
- Harrison, A.F. (1983) Relationship between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in woodland soils. *Soil Biology & Biochemistry* **15**(1), 93-99.
- Hartung, J., B. Elpelt (1992) *Multivariate Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, 4. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien.
- Hattori, T. (1973) *Microbial Life in the Soil*. New York, Marcel Decker.
- Haynes, R.J. (1988) Effect of lime and phosphate addition on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulphur and phosphorus in an acid soil. *Biology and Fertility of Soils* **6**(2), 153ff.

- Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, B.S. Chauhan (1982) Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal* **46**, 970-976.
- Henrot, J., G.P. Robertson (1994) Vegetation removal in two soils in the humid tropics: effect on microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **26** (1), 111-116.
- Hölscher, D. (1995) Wasser- und Stoffhaushalt eines Agrarökosystems mit Waldbrache im östlichen Amazonasgebiet. *Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen*, Heft 106.
- Hofmann, E.D., G.G. Hoffmann (1966) Die Bestimmung der biologischen Tätigkeit in Böden mit Enzymmethoden. *Advances in Enzymology* **28**, 365-390.
- Howeler, R.H. (1981) Mineral nutrition and fertilization of cassava. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 52 Seiten.
- IBGE (1985) Censo Agropecuário, Rio de Janeiro: IBGE, N. 6 - Pará, 1985.
- Illmer, P., F. Schinner (1991) Effects of Lime and Nutrient Salts on the Microbiological Activities of Forest Soils. *Biology and Fertility of Soils*, **11**(4), 261-266.
- Insam, H., K.H. Domsch (1988) Relationship Between Soil Organic Carbon and Microbial Biomass on Chronosequences of Reclamation Sites. *Microbial Ecology* **15**, 177-188.
- Insam, H., K. Haselwandter (1989) Metabolic Quotient of the Soil Microflora in Relation to Plant Succession. *Oecologia* **79**, 174-178.
- IITA - International Institute of Tropical Agriculture. Determining total phosphorus in plant. Manual series No. 7, Chapter 10.
- Isermeyer, H. (1952) Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Carbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **56**, 26-38.
- Jäggi, W. (1976) Die Bestimmung der CO₂-Bildung als Maß der bodenbiologischen Aktivität. *Schweizer Landwirtschaftliche Forschung* **15**, 371-380.
- Jørgensen, R.G. (1995) Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode. *Göttinger bodenkundl. Berichte* **104**, 229 Seiten.
- Jørgensen R.G., P.C. Brookes (1990) Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0,5 M K₂SO₂ soil extracts. *Soil Biology & Biochemistry*, **22**(8),1023-1027.

- Jørgensen, R.G., B. Meyer, T. Müller (1994) Time-Course of the Soil Microbial Biomass Under Wheat - A One Year Field Study. *Soil Biology & Biochemistry* **26**(8), 987-994.
- Jørgensen, R.G., H. Kubler, B. Meyer, V. Wolters (1995) Microbial biomass phosphorus in soils of beech (*Fagus sylvatica* L) forests. *Biology and Fertility of Soils* **19**(2-3), 215-219.
- Jordan, C.F. (1991) Nutrient Cycling Processes and Tropical Forest Management. *Rain Forest Regeneration and Management* **6**, 159-180.
- Jordan, D., R.J. Kremer, W.A. Bergfield, K.Y. Kim, V.N. Cacnio (1995) Evaluation of Microbial Methods as Potential Indicators of Soil Quality in Historical Agricultural Fields. *Biology and Fertility of Soils* **19**(4), 297-302.
- Juma, N.G., M.A. Tabatabai (1977) Effects of trace elements on phosphatase activity in soils. *Soil Science Society of America Journal* **41**, 343-346.
- Juma, N.G., M.A. Tabatabai (1978) Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Science* **126**, 101-108.
- Kandeler, E., H. Gerber (1988) Short-Term Assay of Soil Urease Activity Using Colorimetric Determination of Ammonium. *Biology and Fertility of Soils* **6**, 68-72.
- Kennedy, A.C., K.L. Smith (1995) Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. *Plant and Soil* **170**(1), 75-86.
- Kirchner, M.J., A.G. Wollum II, L.D. King (1993) Soil Microbial Populations and Activities in Reduced Chemical Input Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* **57**, 1289-1295.
- Kleinman, P.J.A., R.B. Bryant, D. Pimentel (1996) Assessing Ecological Sustainability of Slash-and-Burn Agriculture through Soil Fertility Indicators. *Agronomy Journal* **88**, 122-127.
- Ladd, J.N. (1978) Origin and range of enzymes in soil. S. 51-96. In: Burns, R.G. (ed.) *Soil enzymes*. Academic Press, Inc., New York.
- Lenthe, H.-R., J.C. Cordeiro (1985). Explicações Sobre O Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. Teresina-Piaui. (GTZ)
- Lijeroth, E., E. Baath (1988) Bacteria and Fungi of Roots of Different Barley Varieties (*Hordeum vulgare* L.). *Biology and Fertility of Soils* **7**, 53-57.

- Löding, M. (1994) Dynamik der mikrobiellen Biomasse des Bodens in Anbau- und Brachephase eines Kleinbauernsystems im östlichen Amazonasgebiet Brasiliens. Diplomarbeit Institut für Pflanzenbau und Tierhygiene in den Tropen und Subtropen, Göttingen, 71 Seiten.
- Luizao, R.C.C., T.A. Bonde, T. Rosswall (1991) Seasonal Variation of Soil Microbial Biomass - the Effects of Clearfelling a Tropical Rainforest and Establishment of Pasture in the Central Amazon. In: Bonde, T.A.: Size and Dynamics of Active Soil Organic Matter Fraction as Influenced by Soil Management, Linköping Studies in Arts and Science 63, Linköping. (VI)
- Luizão, R.C.C., T.A. Bonde, T. Rosswall (1992) Seasonal variation of soil microbial biomass - the effect of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the central Amazon. *Soil Biology & Biochemistry* **24**(8), 805-813.
- Makboul, H.E., J.C.G. Ottow (1979) Einfluß von Zwei- und Dreischichttonmineralen auf die Dehydrogenase-, Urease- und saure Phosphatase-Aktivität in Modellversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **142**, 500-513.
- Malkomes, H.P. (1991a) Influence of Varied Soil Temperature and Moisture on Microbial Activities Under Laboratory Conditions. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **154**(5), 325-330.
- Malkomes, H.P. (1991b) Existing Alternative Tests to Measure Side-Effects of Pesticides on Soil Microorganisms - Dehydrogenase Activity. *Toxicological and Environmental Chemistry*, **30**(3-4), 167-176.
- Margesin, R., F. Schinner (1994) Phosphomonoesterase, Phosphodiesterase, Phosphotriesterase, and Inorganic Pyrophosphatase Activities in Forest Soils in an Alpine Area: Effect of pH on Enzyme Activity and Extractability Source Biology and Fertility of Soils **18**(4), 320-326
- Martins, P.F. da S., B. Volkhoff, C.C. Cerri, F. Andreux (1990a) Consequências do Cultivo e do Pousio Sobre a Matéria Orgânica do Solo Sob Floresta Natural na Amazônia Oriental. *Acta Amazônica* **20**, 19-28.
- Martins, P.F. da S., B. Volkhoff, C.C. Cerri, F. Andreux (1990b) Efeito do desmatamento e do cultivo sobre características físicas e químicas do solo sob floresta natural na Amazônia Oriental. *Rev. IG, São Paulo* **8-10**, **11**(1), 21-33.

- Martins, P.F. da S., C.C. Cerri, B. Volkoff, F. Andreux, A. Chauvel (1991) Consequences of Clearing And Tillage on the Soil of a Natural Amazonian Ecosystem. *Forest Ecology and Management* **38**, 273-282.
- McCarty, G.W., J.M. Bremner (1991) Production of urease by microbial activity in soils under aerobic and anaerobic conditions. *Biology and Fertility of Soils* **11**, 228-230.
- Mersi, W. von, F. Schinner (1991) An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodinitrotetrazolium chloride. *Biology and Fertility of Soils* **11**, 216-220.
- Nye, P.H. (1958) The Relative Importance of Fallows and Soils in Storing Plant Nutrience in Ghana. *Journal of the West African Science Association* **4**(1), 31-49.
- Nye, P.H., D.J. Greenland (1960) The soil under shifting cultivation. Technical Communication no. 51. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, UK.
- Odum, E.P. (1969) The strategy of ecosystem development - An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *Science* **164**, 262-270.
- Olsen S.R., L.E. Sommers (1982) Phosphorus. Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (eds). *Methods of soil analysis, Part 2*. American Society of Agronomy Inc., Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin USA.
- Page, A.L., R.H. Miller, D.R. Keeney (eds) (1982) *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy Inc., Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin USA.
- Pagel, H. (1981) *Grundlagen des Nährstoffhaushaltes tropischer Böden*. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- Pancholy, S.K., E.L. Rice (1973). *Soil Enzymes in Relation to Old Field Succession: Amylase, Cellulase, Invertase, Dehydrogenase, and Urease*. *Soil Science Society of America Proceedings* **37**, 47-50.
- Pang, P.C.K., H. Kolenko (1986) Phosphomonoesterase activity in forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, **18**, 35-40.
- Palm, C.A., L.T. Szott (Draft) *Soil and Vegetation Dynamics During Fallows*. Proyecto Suelos Tropicales, INIPA-NCSU, Yurimaguas, Peru.

- Powlson, D.S., P.C. Brookes (1987) Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, **19**(2),159-164.
- Rastin, N., K. Rosenplänter, A. Hüttermann (1988) Seasonal Variation of Enzyme Activity and their Dependence on Certain Soil Factors in a Beech Forest Soil. *Soil Biology & Biochemistry* **20**(5) ,637-642.
- Rego, R.S., B.N.R. da Silva, R.S.O. Junior (1993) Detailed soil survey in an area in the municipality of Igarapé Açu. In: 1. Workshop SHIFT. Belém, março de 1993. Resumos. CNPq, IBAMA, BMFT, Geesthacht, 156.
- Rehm, S., G. Espig (1984) *Die Kulturpflanzen der Tropen und Subtropen*. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- Reynolds, C.M., D.C. Wolf, J.A. Armbruster (1985) Factors related to urea hydrolysis in soils. *Soil Science Society of America Journal* **49**, 104-108.
- Rojo, M.J., S.G. Carcedo, M.P. Mateos (1990) Distribution and characterization of phosphatase and organic phosphorus in soil fractions. *Soil Biology and Biochemistry* **22**(2), 169-174.
- Romanyà, J., P.K. Khanna, R.L. Raison (1994) Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and desorption of phosphorus. *Forest Ecology and Management* **65**, 89-103.
- Saa, A., M.A. Trasar-Cepeda, F. Gil-Sotres, T. Carballas (1993) Changes in soil phosphorus and acid phosphatase activity immediately following forest fires. *Soil Biology and Biochemistry* **25**(9), 1223-1230.
- Sanchez, P.A. (1976) *Properties and Management of Soils in the Tropics*. John Wiley & Sons, New York.
- Sanchez, P.A., J.G. Salinas (1981) Low-Input Technology For Managing Oxisols and Ultisols in Tropical America. *Advances in Agronomy* **34**, 279-406.
- Santos, O.M., B.M. Grisi (1981) Efeito do desmatamento na atividade dos microorganismos de solo de terra firme na Amazonia. *Acta Amazonica* **11**(1), 97-102.
- Santruckova, H. (1992) Microbial biomass, activity and soil respiration in relation to secondary succession. *Pedobiologia* **36**, 341-350.

- Sarkar, J.M., A. Leonowicz, J.-M. Bollag (1989) Immobilization of enzymes on clays and soils. *Soil Biology and Biochemistry* **21**(2), 223-230.
- Saxena, K.G., P.S. Ramakrishnan (1986) Nitrification during slash and burn agriculture (Jhum) in north-eastern India. *Acta Oecologia Oecol.Plant.* **7** (21), 307-319.
- Scharpf, H.-C. (1977) Der Mineralstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf. Dissertation. Fakultät für Gartenbau und Landeskultur, TU Hannover.
- Schinner, F., R. Öhlinger, E. Kandeler (1991) *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. Berlin, Springer-Verlag.
- Schinner, F., W. von Mersi (1990) Xylanase-, CM-Cellulase- And Invertase Activity in Soil, an Improved Method. *Soil Biology and Biochemistry* **22**, 511-515.
- Schlegel, H.G. (1992) *Mikrobiologie*, 7. Auflage. Thieme-Verlag.
- Serrasolsas, I., P.K. Khanna (1995a) Changes in heated and autoclaved forest soils of SE Australia. 1. Carbon and nitrogen. *Biogeochemistry* **29**(1), 3-24.
- Serrasolsas, I., P.K. Khanna (1995b) Changes in heated and autoclaved forest soils of SE Australia. 2. Phosphorus and phosphatase activity. *Biogeochemistry* **29**(1), 25-41.
- Singh, J.S., A.S. Raghubanshi, R.S. Singh, S.C. Srivastava (1989) Microbial Biomass Acts as a Source of Plant Nutrients in Dry Tropical Forest and Savanna. *Nature* **338**, 499-500.
- Sioli, H. (1968) Former and Recent Utilizations of Amazonia and their Impact on the Environment. In: Sioli, H.: *The Amazon Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Tropical River and its Basin*, 675-705 (Chapter 27)
- SMSS - Soil Service Staff (1990) *Keys to Soil Taxonomy*, SMSS Technical Monograph No. **19**, Virginia Polytechnic Institute And State University.
- SNLCS *Manual de Métodos de Análise de Solo - Análise de fertilidade*. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro.
- Sparling, G.P. (1982) The Soil Biomass. In: Page, A.L. Miller, R.H. Keeney, D.R.: *Methods of Soil Analysis, Part 2*, American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin USA.
- Sparling, G.P. (1985) The Soil Biomass. In: Vaughan, D., R.E. Malcolm: *Soil Organic Matter and Biological Activity*, *Developments in Plant and Soil Sciences* Vol. **16**, 223-262.

- Sparling, G.P. (1990) Soil Biomass Evaluation. In: 'PACIFICLAND Workshop on the Establishment of Soil Management Experiments on Sloping Lands. S. 163-184. IBSRAM Technical Notes No. 4. Bangkok, Thailand.
- Sparling, G.P. (1991) Organic matter C and soil microbial biomass C as indicators of sustainable land use. International Workshop: Evaluation for sustainable land use management 15-21 september 1991, Chiang Rai, Thailand.
- Sparling, G.P., A.W. West (1988) A Direct Extraction Method to Estimate Soil Microbial C: Calibration in situ Using Microbial Respiration and ¹⁴C Labelled Cells. *Soil Biology & Biochemistry* **20**, 337-343.
- Speir, T.W., J.C. Cowling (1991) Phosphatase Activities of Pasture Plants and Soils - Relationship with Plant Productivity and Soil-P Fertility Indices. *Biology and Fertility of Soils* **12**(3), 189-194.
- Srivastava, S.C., J.S. Singh (1989) Effect of Cultivation on Microbial Carbon and Nitrogen in Dry Tropical Forest Soils. *Biology and Fertility of Soils* **8**, 343-348.
- Stevenson, F.J. (1986) *Cycles of Soil*. John Wiley & Sons, New York.
- Stojanovic, B.J. (1959) Hydrolysis of urea in soil as affected by season and by added urease. *Soil Science* **88**, 251-255.
- Tabatabai, M.A. (1982). Soil enzymes. In: Page, A.L., R.H. Miller *Methods of soil analysis, Part 2 Chemical and microbiological properties*. Agronomy Monograph no. 9, Madison, USA, S. 903-947.
- Tabatabai, M.A., J.M. Bremner (1969) Use of p-Nitrophenol-Phosphate for Assay of Soil Phosphatase Activity. *Soil Biology & Biochemistry* **1**, 301-307.
- Tabatabai, M.A., J.M. Bremner (1970) Arylsulphatase activity in soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America* **34**, 225-229.
- Tarafdar, J.C., H. Marschner (1994) Efficiency of VAM hyphae in utilisation of organic phosphorus by wheat plants. *Soil Science and Plant Nutrition* **40**(4), 593-600.
- Tate, K.R., D.J. Ross, A.J. Ramsey, K.N. Whale (1991) Microbial Biomass and Bacteria in two Pasture Soils: An Assessment of Measurement Procedures, Temporal Variations, and the Influence of P Fertility Status. *Plant and Soil* **132**, 233-241.

- Thielen-Klinge, A. (1997) Rolle der biologischen N₂-Fixierung von Baumleguminosen im östlichen Amazonasgebiet, Brasilien - Anwendung der ¹⁵N *natural abundance* Methode. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Tiessen, H., E. Cuevas, P. Chacon (1994) The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* **371**(6500), 783-785.
- Tiessen, H.E., J.O. Moir (1993) Characterization of available phosphorus by sequential extraction. In: M.R. Carter (ed.) *Soil sampling and methods of analysis*, S. 75-86, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers.
- Toland, D.E., D.R. Zak (1994) Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research - Revue Canadienne de Recherche Forestiere* **24**(8), 1711-1716.
- UEPAE (Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Belém) *Recomendações Básicas - Milho*. Grupo de Articulação, Pesquisa e Extensão, Belém, 1987.
- Uhl, C., C.F. Jordan (1984) Succession and nutrient dynamics following forest cutting and burning in Amazonia. *Ecology* **65**(5), 1476-1490.
- Uzêda, M. C. (1995) Efeitos do cultivo e do pousio sobre o solo e a vegetação secundária na Amazônia Oriental. Tese de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 74 páginas
- Vance, E.D., P.C. Brookes, D.S. Jenkinson (1987) Microbial biomass measurements in forest soils: the use of the chloroform fumigation-incubation method in strongly acid soils. *Soil Biology & Biochemistry* **19**(6), 697-702.
- Wadsworth, G., R.J. Southard, M.J. Singer (1988) Effects of Fallow Length on Organic Carbon and Soil Fabric of Some Tropical Ultisols. *Soil Science Society of America Journal* **52**(5), 1424-1430.
- Wander, M.M., S.J. Traina, B.R. Stinner, S.E. Peters (1994) Organic and Conventional Management Effects on Biologically Active Soil Organic Matter Pools. *Soil Science Society of America Journal* **58**(4), 1130-1139.
- Watanabe, F.S., S.R. Olsen (1965) Test of ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil, *Soil Science Society of America Proceedings* **29**, 677-678.

- Wardle, D.A. (1993) Changes in the microbial biomass and metabolic quotient during leaf litter succession in some New Zealand forest and scrubland ecosystems. *Functional Ecology* **7**, 346-355.
- Wardle, D.A., A. Ghani (1995) Why is the strength of relationships between pairs of methods for estimating soil microbial biomass often so variable? *Soil Biology & Biochemistry* **27**(6), 821-828.
- Wick, B. (1997) Microbiological indicators for quality of soils at various stages of degradation in the forest-savanna-transition zone, south-western Nigeria. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- Wood, M. (1991) Biological aspects of soil protection. *Soil Use and Management* **7**(3), 130-136.
- Zantua, M.I., J.M. Bremner (1976) Production and persistence of urease activity in soils. *Soil Biology & Biochemistry* **8**, 369-374.

Anhang

Anhang 1 Nutzungsgeschichte der Untersuchungsflächen

Die Informationen zur Nutzungsvorgeschichte und über das Alter der Brachevegetationen beruhen auf den mündlichen Aussagen des jeweiligen Eigentümers einer Fläche, seiner Familie oder eines Nachbarn. Sie sollen lediglich als Hilfsmittel dienen, wenn es darum geht, die Untersuchungsergebnisse verschiedener Flächen miteinander zu vergleichen bzw. zu interpretieren. Die Verlässlichkeit dieser Informationen steht und fällt naturgemäß mit dem Erinnerungsvermögen sowie der Gewissenhaftigkeit der Befragten.

Anhang 1a Nutzungsgeschichte der Chronosequenz *Marcelino*

Die vorliegenden Informationen basieren auf Aussagen des S. Marcelino und seines Sohnes António. Die Angaben wurden mit HÖLSCHER (1995) abgeglichen.

- Maniokfläche (Beginn der Brache)

1½ Jahre altes Maniokfeld (*Manihot esculenta*) auf dem Land des Bauern S. Marcelino; vorherige Nutzung: 10-jährige Brachevegetation, Anbau 1991-92, Ernte seit Mitte 1992, auf den Probenahmeorten am 17.11.92, Höhe der Vegetation ca. 2 m, 4 verschiedene Manioksorten

- 2-jährige Brache

2½ Jahre alte Sekundärvegetation auf dem Land des Bauern S. Marcelino

vorherige Nutzung: 1977 Rodung einer 15-20-jährigen Brachevegetation, Anfang der 80er Jahre erste Pflanzung von Mais und Maniok (traditionell), anschließend 5-6 Jahre Brache, Mitte der 80er Jahre zweite Anbauphase, Brache seit 1989, Höhe der Vegetation ca. 1,70 m

- 7-jährige Brache

7 Jahre alte Sekundärvegetation auf dem Land des Bauern S. Marcelino

vorherige Nutzung: 1983 Rodung einer 15-jährigen Brachevegetation, Anbau 1984-85, seitdem Brache, Höhe der Vegetation ca. 6 m

- 40-jährige Brache

ca. 40 Jahre alte Sekundärvegetation oder explorierter Primärwald auf dem Land des Bauern S. Marcelino. Es ist nicht bekannt, ob die Vegetation dieser Fläche jemals vollständig abgeschlagen wurde oder nicht, Höhe der Vegetation ca. 25 m, Holznutzung, Auflagehorizont ca. 5 cm stark (wurde bei Probenahme der Bodentiefe 0-10 cm weggeräumt)

- Pfefferfläche

4 Jahre alte Pfefferpflanzung (*Piper nigrum*) auf dem Land des Bauer S. Francisco

vorherige Nutzung: 1981(?) Rodung einer Brachevegetation (Alter unbekannt), 1981-84 traditioneller Anbau (Mais, Reis, Maniok), 1984-87 Brache, 1987 Baumwolle, anschließend Pflanzung der Pfefferkultur, Pflanzabstand: 2 x 2 m, zweimalige Düngung pro Jahr (jeweils Jan./Feb. und Mai) mit 50 kg des NPK-Düngers '18-18-18' auf der Gesamtfläche von ca. 2500 m², die Anlage steht vor dem Zusammenbruch, Befall durch *Fusarium solani* f.sp. *piperi*.

Die Fläche ist nahe dem Wohnhaus des Bauern und seiner Familie gelegen; es wird Federvieh gehalten.

- mechanisch bearbeitete Fläche

7 Monate alte Sekundärvegetation auf dem Land des Bauern S. Marcelino

vorherige Nutzung: 1977 Rodung einer 50-jährigen Brachevegetation, 1978-80 traditioneller Anbau, von 1980-84 Brache, 1985-86 traditioneller Anbau, seit 1987 *Vigna* und Baumwolle, Bodenbearbeitung mit Traktor und Pflug 2x pro Jahr, seit Februar 1992 Brache.

Die Fläche ist völlig vergrast, es sind praktisch keine verholzte Pflanzen mehr vorhanden, die Vegetation wird dominiert von einer niedrigen *Cassia*-Spezies, Höhe des Bestandes ca. 0,60 m., geplante Nutzung: Anlage einer Maracujá-Plantage.

Anhang 1b Nutzungsgeschichte der Chronosequenz *Cumarú*

Die vorliegenden Informationen stammen von Raimundo (R), Sohn von S. Gonzaga (Interview am 27.8.93), und Herrn Gonzaga (G) (30.11.93). Herr Gonzaga lebt seit 1962 auf diesem Flecken Land.

- Maniokfläche (ohne Mais und Bohnen!),

R: Maniok wurde im Februar 1993 gepflanzt (~6 Monate), letztes Hacken Ende Juni 93 (Regeneration der Sekundärvegetation setzt 2 Monate vorher ein), Pflanzdichte ca. 1 x 1 m, Pflanzmaterial ca. 15 cm lang, voraussichtliche Ernte Januar/Februar 94 (kontinuierlich), Höhe des Bestandes 180 cm, die gerodete und gebrannte Brachevegetation war ca. 6 Jahre alt, jedoch "fracá", also schwachwüchsig - dieses war der Grund, keinen Mais zu pflanzen, Feldgröße 2 tarefas (3 tarefas ~ 1 ha).

G: Maniok wurde im Januar 93 gepflanzt, keine Düngung, nur zweimaliges Hacken, vorher 8-jährige Brachevegetation (schwachwüchsig), vorher Mais-Reis-Maniok (ohne Düngung), vorher 25-jährige Brache.

- 1-jährige Brache

R: Ernte im Januar - Februar 93, letztes Hacken im August 92, es wurde wie bei der "Maniokfläche" ausschließlich Maniok angebaut, die für den Anbau gerodete Brache war ca. 7 Jahre alt, jedoch deutlich kräftiger als bei der "Maniokfläche", Feldgröße: 2 trefas.

G: Maniokernte im Januar 93, Pflanzung im Januar 92, vorher 8-jährige Brachevegetation (schwach), vorher Mais-Reis-Maniok (ohne Düngung), vorher 25-jährige Brachevegetation

- 4-jährige Brache

(= Behandlung 1 im Feldversuch 'Cumarú', es wurde die Wiederholungen A,B,C,D; s. Anhang 2),

R: letzter Anbau mit Baumwolle (gedüngt!), dafür wurde eine starke, 8-jährige Brachevegetation geschlagen.

G: vor dem Umbrechen der Brachevegetation im November 92 lag die Fläche 3 Jahre lang brach; davor wurde Baumwolle angebaut (Applikation von 10 g NPK-Dünger der Formulierung 10-28-20 pro Pflanze), für die eine "kräftige" 8-jährige Brachevegetation geschlagen worden war; vorher Mais-Maniok ohne Düngung (25 trefas), vorher 25 Jahre Brache.

- 15-jährige Brache

R: Holznutzung (u.a. Hausbau), Größe 2 trefas. Beobachtung: Die Wiederholungen c und d wurden im hinteren Bereich der Fläche gezogen, der sich hinsichtlich seiner Vegetationszusammensetzung deutlich vom vorderen Teil unterscheidet: es dominierte die Strelitziaceae *Phenakospermum guianensis* ("Sororoca").

G: Herr Gonzaga schätzt das Alter dieser Brachevegetation auf 25 Jahre, vorher Mais-Reis-Maniok.

- 30-jährige Brache

Holznutzung, relativ schwache Capoeira, da häufig Feuer reingelaufen ist (G), Größe 20 trefas.

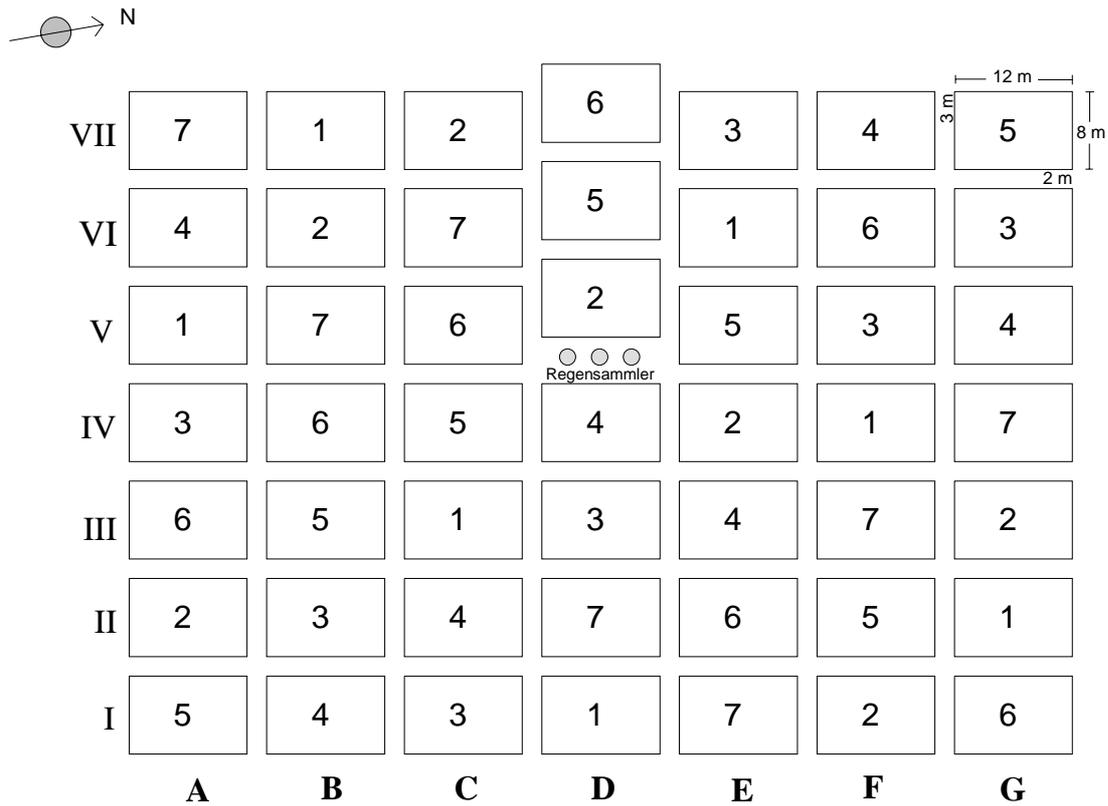
Beobachtung: eine Wiederholung wurde an einer Stelle gezogen, die etwas tiefer lag und scheinbar vom Grundwasser beeinflusst war.

Anhang 1C Nutzungsgeschichte der Chronosequenzen *Gonzaga* und *Lucas*

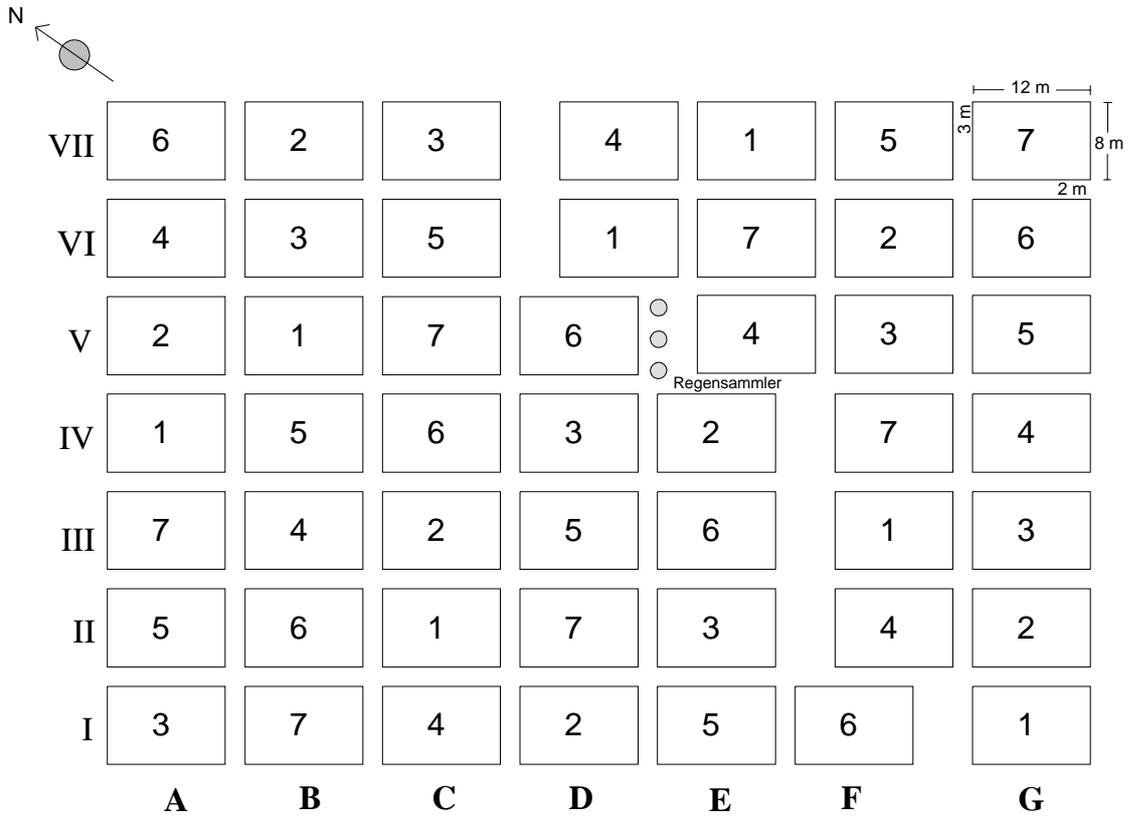
- Maniokfläche = traditioneller Anbau (Mais-Maniok) zum Zeitpunkt der Maniokernte, Brachevegetation ca. 6 Monate alt (= Behandlung 2 des Feldversuches Cumarú/Iracema)
- Maniokfläche = traditioneller Anbau (Mais-Bohnen-Maniok) zum Zeitpunkt der Maniokernte, Brachevegetation ca. 6 Monate alt (= Behandlung 3 des Feldversuches Cumarú/Iracema)
- 5-jährige Brache (= Behandlung 1 des Feldversuches Cumarú/Iracema)
vorherige Nutzung (gilt auch für die Anbausysteme des Feldversuches):
für *Gonzaga* s. Chronosequenz *Cumarú*, 4-j. Brache
- 8-jährige Brache = vorherige Nutzung nicht bekannt
- Maniokfläche = Anbau ohne Brennen (Mais-Maniok) zum Zeitpunkt der Maniokernte, Brachevegetation ca. 6 Monate alt (= Behandlung 4 des Feldversuches Cumarú/Iracema)
- Maniokfläche = Anbau (Mais-Maniok) mit Leguminose als life-mulching zum Zeitpunkt der Maniokernte, Brachevegetation ca. 6 Monate alt (= Behandlung 5 des Feldversuches Cumarú/Iracema)
- Maracujá-Plantage (Cumarú) - 2-jährige Maracujá-Plantage, im Januar 1992 gepflanzt nach 2 Jahren Brache ("niedrige Vegetation"), davor Urucú (*Bixa oralea*), davor 4 Jahre lang Pfeffer (*Piper nigrum*), davor Maniok
- Papaya-Plantage (Iracema) = ehemalige Papaya-Plantage (mamão) mit Kürbis-(arbórbora) und Melonenkultur (melão), 10 Tage zuvor war Mais gesät worden (noch nicht gedüngt)

Anhang 2 Design der Feldversuche (der Weg befindet sich jeweils am unteren Rand der Darstellung)

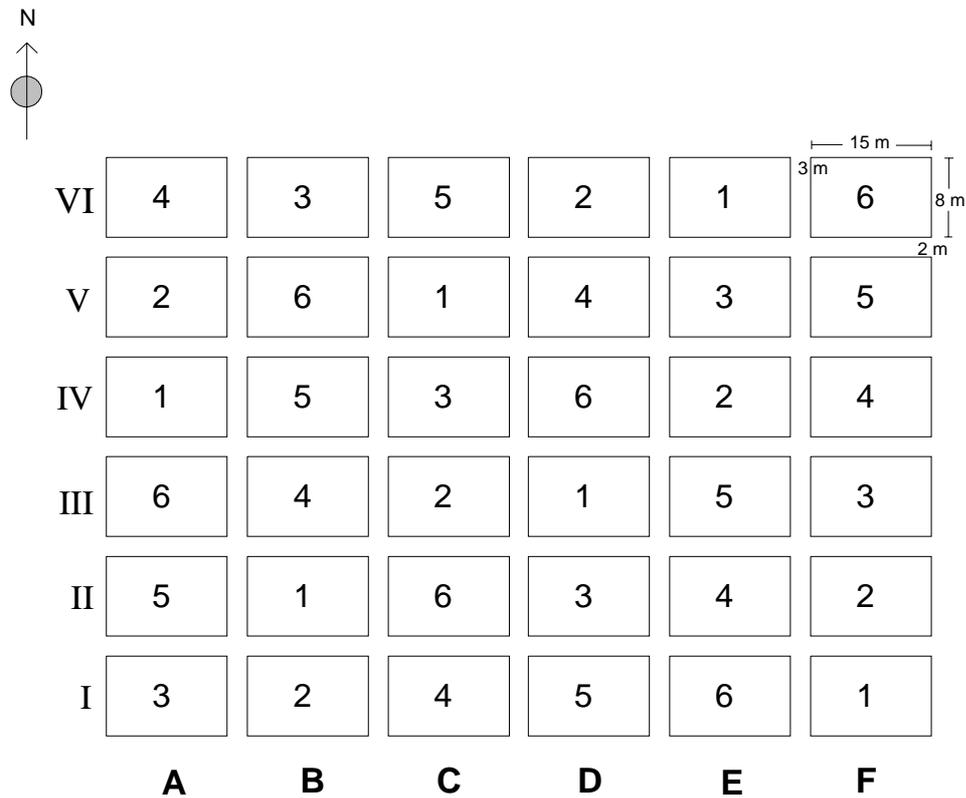
Anhang 2a Design des Feldversuches 'Cumarú'



Anhang 2b Design des Feldversuches 'Iracema'



Anhang 2c Design des Feldversuches 'Chagas'



Anhang 3 Charakteristika der in den Feldversuchen verwendeten Mais- und *Vigna*-Sorten

Anhang 3a Charakteristika der Maissorte 'BR-106'

Typus	Zahnmais
mittlere Zyklen	
Saat - männliche Blüte	66 Tage
Saat - weibliche Blüte	70 Tage
Saat - physiologische Reife	132 Tage
mittlere Pflanzenhöhe	228 cm
mittlere Kolbenhöhe	129 cm
mittlere Kolbenlänge	167 mm
1000-Korngewicht	298 g
Produktivität (Korn)	5.000 kg ha ⁻¹

'BR-106' entstand durch Kreuzung der Herkunft 'Tuxpeño' mit den Sorten 'Maya', 'Dentado Composto', 'Centralmex' und 'Tuxpeño 1'. Empfohlen wird die Sorte für südwestliche und zentrale Regionen Brasiliens (z.B. Minas Gerais, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul) (Novas Cultivares (1987) - Publicação da EMBRAPA, Vol. 13/14).

Anhang 3b Charakteristika der Bohnensorte 'BR-3'

Typus	undeterminiertes Wachstum
Habitus	halbaufrecht
mittlerer Zyklus Saat - Blüte	45 Tage
Blüte	weiß, mit nicht-pigmentierten Flügeln
Bohnen	groß, matt weiß
1000-Korngewicht	300 g

'BR-3' ist durch Selektion hinsichtlich Produktivität, Krankheits- und Schädlingsresistenz sowie Adaption an die Klimabedingungen des Nordost-Parás entstanden. Das Ausgangsmaterial stammt aus dem Nordosten Brasiliens („quebra cadeira“ oder „cheque-ouro“).

Anhang 4 Bodenchemische Parameter in den Chronosequenzen *Marcelino*, *Cumarú*, *Gonzaga* und *Lucas* (Ergänzung zu Tab. 17)

	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	C _{org} (g kg ⁻¹)	N _t (g kg ⁻¹)	NH ₄ (mg kg ⁻¹)	NO ₃ (mg kg ⁻¹)	P _t (g kg ⁻¹)	P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	H ⁺	aK	KAK	Basen- sättigung (%)
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 5-20 cm, n=4)																
Maniokfläche	5,51	4,22	6,4	0,68	10,0	2,5	0,15	2,3	0,78	0,033	0,023	0,1	2,8	0,83	3,68	22
1-j. Brache	5,48	4,26	7,3	0,80	9,1	2,8	0,20	2,0	1,18	0,035	0,030	0,2	2,7	1,24	4,17	30
4-j. Brache	5,27	4,00	7,1	0,75	9,6	2,9	0,20	2,0	0,50	0,030	0,035	0,5	2,9	0,57	3,89	15
15-j. Brache	5,22	3,97	7,1	0,73	18,2	4,2	0,20	2,0	0,40	0,025	0,030	0,6	2,7	0,46	3,76	12
30-j. Brache	4,81	3,77	7,2	0,88	10,3	4,7	0,45	2,0	0,15	0,028	0,030	1,0	3,0	0,21	4,18	5
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 20-50 cm, n=4)																
Maniokfläche	5,22	3,99	4,4	0,55	7,9	2,6	0,20	1,0	0,40	0,028	0,025	0,9	2,3	0,45	3,58	13
1-j. Brache	5,22	3,99	4,7	0,65	10,0	2,7	0,23	1,5	0,35	0,033	0,030	1,0	2,3	0,41	3,66	11
4-j. Brache	5,25	4,00	4,6	0,58	6,0	2,3	0,20	2,0	0,30	0,020	0,030	0,8	2,4	0,35	3,55	10
15-j. Brache	5,27	3,98	4,4	0,55	9,0	2,7	0,40	1,0	0,35	0,015	0,035	0,9	2,4	0,40	3,65	11
30-j. Brache	5,05	3,87	4,3	0,63	8,0	1,1	0,45	1,0	0,20	0,015	0,028	1,2	2,2	0,24	3,54	7
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (Bodentiefe 10-20 cm, n=7)																
½-j. Brache	5,26	4,07	5,4	0,90	8,7	-	0,10	2,0	0,30	0,034	0,040	0,00	2,1	0,37	2,37	16
5-j. Brache	5,17	4,00	5,9	1,00	8,6	-	0,10	1,9	0,20	0,031	0,010	0,00	2,4	0,24	2,64	9
8-j. Brache	5,46	4,06	5,8	0,73	8,5	-	0,10	2,0	0,21	0,020	0,019	0,00	2,1	0,25	2,32	11
Chronosequenz <i>Lucas</i> (Bodentiefe 10-20 cm, n=7)																
½-j. Brache	5,25	4,12	0,74	0,80	9,8	-	0,10	1,4	0,20	0,029	0,020	0,00	2,4	0,24	2,64	9
5-j. Brache	5,20	4,05	0,68	0,60	11,1	-	0,10	1,0	0,30	0,030	0,020	0,00	2,4	0,35	2,45	14
8-j. Brache	5,14	4,03	0,66	0,89	7,4	-	0,10	1,1	0,33	0,029	0,026	0,01	3,2	0,38	3,61	11

Anhang 5 Enzymatische Aktivitäten in den Chronosequenzen *Cumarú* (5-20 und 20-50 cm Bodentiefe), *Gonzaga* (10-20 cm) und *Lucas* (10-20 cm) (Ergänzung zu Tab. 20)

	saure Phosphatase $\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	basische Phosphatase $\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	Urease $\mu\text{g N}$ $\text{g TS}^{-1} 2\text{h}^{-1}$	Aryl- Sulfatase $\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	β - Glucosidase $\mu\text{g p-NP}$ $\text{g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$	Dehydroge- nase $\mu\text{g INTF}$ $\text{g TS}^{-1} 2\text{h}^{-1}$	Cellulase $\mu\text{g GLC}$ $\text{g TS}^{-1} 24\text{h}^{-1}$
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 5-20 cm, n=4)							
Maniokfläche	1133	29,0	18,1	36,4	16,4	38,8	-
1-j. Brache	1071	21,7	18,0	36,8	11,9	43,1	-
4-j. Brache	1352	23,7	18,3	30,8	9,4	44,7	-
15-j. Brache	1705	28,9	26,2	33,8	10,3	45,5	-
30-j. Brache	1778	34,4	18,9	28,9	8,8	40,7	-
Chronosequenz <i>Cumarú</i> (Bodentiefe 20-50 cm, n=4)							
Maniokfläche	826	8,0	8,7	4,8	6,4	13,8	-
1-j. Brache	892	26,7	9,0	3,6	4,5	18,6	-
4-j. Brache	909	25,0	7,7	8,0	3,7	17,4	-
15-j. Brache	963	10,0	5,1	7,9	2,1	17,1	-
30-j. Brache	944	32,6	7,6	6,2	4,1	14,9	-
Chronosequenz <i>Gonzaga</i> (Bodentiefe 10-20 cm, n=7)							
½-jährige Brache	911	-	20,7	-	11,0	-	-
5-jährige Brache	1016	-	21,2	-	9,5	-	-
8-jährige Brache	1042	-	17,6	-	8,7	-	-
Chronosequenz <i>Lucas</i> (Bodentiefe 10-20 cm, n=7)							
½-jährige Brache	1331	-	22,1	-	10,1	-	-
5-jährige Brache	1346	-	27,0	-	7,0	-	-
8-jährige Brache	1522	-	20,9	-	7,2	-	-

Anhang 6 Varianzanalysen der enzymatischen Aktivitäten in der Chronosequenz *Cumarú* mit den Hauptfaktoren Brachealter (1) und Bodentiefe (2)

Anhang 6a Basische Phosphatase

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	1,303	39	0,222	5,862	0,00
Bodentiefe (2)	2	11,016	39	0,222	49,571	0,00
Interaktion von 1 u. 2	8	0,576	39	0,222	2,590	0,02

Daten wurden logarithmiert, da nicht normalverteilt.

Anhang 6b Urease

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	53,888	43	14,344	3,757	0,01
Bodentiefe (2)	2	1937,818	43	14,344	135,098	0,00
Interaktion von 1 u. 2	8	67,054	43	14,344	4,675	0,00

Anhang 6c β -Glucosidase

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	25,852	44	17,259	1,4979	0,219
Bodentiefe (2)	2	3889,431	44	17,259	225,3589	0,000
Interaktion von 1 u. 2	8	77,994	44	17,259	4,5191	0,000

Anhang 6d Dehydrogenase

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	0,0869	45	0,0231	3,763	0,010
Bodentiefe (2)	2	13,7776	45	0,0231	596,862	0,000
Interaktion von 1 u. 2	8	0,0722	45	0,0231	3,126	0,007

Anhang 6e Aryl-Sulfatase

	FG Effekt	MS Effekt	FG Fehler	MS Fehler	F	Signifikanz- niveau
Brachealter (1)	4	293,616	42	72,322	4,060	0,007
Bodentiefe (2)	2	8877,538	42	72,322	122,750	0,000
Interaktion von 1 u. 2	8	476,563	42	72,322	6,590	0,000

Anhang 7 Veränderung biologischer und chemischer Parameter in 10-20 cm Bodentiefe des traditionellen Anbausystems
(Ergänzung zu den Tabellen 28 und 29)

Anhang 7a Biologische und chemische Parameter im Boden (10-20 cm) des traditionellen Anbausystems im Feldversuch Cumarú 1992-94,
Tukey ($p < 0,05$)¹

Tage nach dem Brennen	0 unmittelbar vor dem Brennen	6 nach dem Brennen	27 erste leichte Regenfällen	79 nach Maissaat und Maniokpflanzen Beginn d. Regenzeit	112 männliche Maisblüte	164 Ernte Mais	248 Ernte <i>Vigna</i> letztes Hacken	454 Ernte Maniok
pH(H ₂ O)	¹ 5,63 b	5,65 b	5,25 a	5,55 b	5,54 b	5,55 b	5,26 a	5,26 a
pH(CaCl ₂)	4,23 b	4,24 b	4,16 ab	4,23 b	4,22 b	4,19 ab	4,08 a	4,07 a
C _{org} (g kg ⁻¹)	6,7 ab	6,4 ab	6,0 ab	7,1 ab	6,4 ab	7,7 b	6,2 ab	5,4 a
N _t (g kg ⁻¹)	0,80 a	0,81 a	0,77 a	0,74 a	0,79 a	0,84 a	0,74 a	0,90 ²
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	2,0 a	2,0 a	2,0 a	3,0 ab	3,0 ab	3,4 b	2,0 a	2,0 a
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,54 b	0,57 b	0,29 a	0,54 b	0,59 b	0,59 b	0,61 b	0,30 ²
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,040 ab	0,041 ab	0,044 ab	0,091 c	0,081 c	0,057 b	0,049 ab	0,034 a
Na ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,034 ab	0,036 ab	0,036 ab	0,029 a	0,040 b	0,029 a	0,031 ab	0,040 ²
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	0,20 abc	0,17 abc	0,00 a	0,31 c	0,09 ab	0,24 bc	0,20 abc	0,00 a
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	2,86 b	2,79 b	2,71 ab	2,30 ab	2,43 ab	2,21 ab	2,76 b	2,07 a
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	0,62 b	0,65 b	0,37 a	0,66 b	0,71 b	0,67 b	0,69 b	0,37 ³
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	3,67 a	3,61 a	3,08 a	3,28 a	3,22 a	3,13 a	3,65 a	2,45 ³
Basensättigung (%)	17 abc	18 abc	12 a	21 bc	23 c	22 bc	19 bc	16 ³
saure Phosphatase	1498 d	1432 cd	1598 d	1111 ab	1096 ab	1270 bc	1099 ab	911 a
Urease	15,3 abc	14,7 abc	10,8 a	12,9 ab	17,3 bc	17,1 bc	18,7 bc	20,7 c
β-Glucosidase	7,8 ab	7,7 a	7,2 a	8,3 ab	14,3 c	12,5 bc	11,7 abc	11,0 abc

¹ Rangtest zum Vergleich der Probenahmeterminale jedes einzelnen Parameters

² beruht auf nur einem Meßwert (n=1) ³ beinhaltet nur einen Meßwert von Ca+Mg

Anhang 7b Biologische und chemische Parameter im Boden (10-20 cm) des traditionellen Anbausystems im Feldversuch Iracema 1992-94, Tukey ($p < 0,05$)

Tage nach dem Brennen	0 unmittelbar vor dem Brennen	1 kurz nach dem Brennen	50 Beginn der Regenzeit vor Maissaat	155 Ernte Mais	238 Ernte <i>Vigna</i> letztes Hacken	439 Ernte Maniok
pH(H ₂ O)	5,32 a	5,29 a	5,31 a	5,54 a	5,28 a	5,25 a
pH(CaCl ₂)	4,17 a	4,23 a	4,24 a	4,19 a	4,15 a	4,12 a
C _{org} (g kg ⁻¹)	-	-	-	6,8 a	7,1 a	7,4 a
N _t (g kg ⁻¹)	-	-	-	0,79	0,70	0,80 ²
P _i (NC) (mg kg ⁻¹)	-	-	-	2,0 b	2,7 c	1,4 a
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,41	0,41	0,20 ²
K ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,046 b	0,039 b	0,029 a
Na ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,029	0,019	0,020 ²
Al ³⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,63 b	0,56 b	0,00 a
H ⁺ (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	2,33 a	3,09 b	2,37 a
aK (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	0,49	0,47	0,24 ²
KAK (cmol(+) kg ⁻¹)	-	-	-	3,45	3,91	2,64 ²
Basensättigung (%)	-	-	-	14	12	9 ²
saure Phosphatase	-	-	-	1708 b	1741 b	1331 a
Urease	-	-	-	15,5 a	16,1 a	22,2 a
β -Glucosidase	-	-	-	10,0 a	9,7 a	6,1 a

¹ Rangtest zum Vergleich der Probenahmeterminale jedes einzelnen Parameters

² beruht auf nur einem Meßwert (n=1)

Anhang 8 Vergleich der enzymatischen Aktivitäten in verschiedenen Nutzungs- und Anbausystemen

Anhang 8a Vergleich der enzymatischen Aktivitäten im Boden (0-10 cm) der 3-4-jährigen Brache (Referenz), des traditionellen Anbausystems und modifizierten Anbausystemen, Tukey-Test ($p < 0,05$) der verschiedenen Systeme ein und derselben Probenahme, Cumarú

Tage nach dem Brennen	0	6	27	79	112	164	248	454
	am Tag des Brennens ¹	nach dem Brennen ¹	erste leichte Regenfällen	nach Maissaat u. Maniokpflanzen Beginn Regenzeit	männliche Maisblüte	Ernte Mais	Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	Ernte Maniok ²
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	980 a	980 ⁺	1154 a	997 a	821 a	1051 a	1118 a	938 a
traditioneller Anbau [2]	1020 a	1058	919 b	602 b	558 b	656 b	752 b	590 bc
ohne Brennen [4]	1119 a	1119 ⁺	1147 a	962 a	840 a	909 a	857 b	754 c
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	685 b	747 b	575 b
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	755 b	639 bc
Urease ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} 2 \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	26,5 a	26,5 ⁺	22,2 a	15,5 a	20,1 a	23,5 a	31,9 a	32,7 a
traditioneller Anbau [2]	25,7 a	28,0	28,1 a	15,3 a	15,4 a	20,7 ab	25,3 b	30,3 ab
ohne Brennen [4]	24,8 a	24,8 ⁺	27,5 a	17,0 a	18,4 a	24,0 a	27,6 ab	32,3 a
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	18,3 b	24,7 b	26,1 b
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	26,0 ab	30,0 ab
β-Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	9,9 a	9,9 ⁺	16,3 a	24,6 a	23,6 a	30,1 a	24,0 ab	22,7 a
traditioneller Anbau [2]	10,0 a	12,8	11,1 b	13,9 b	14,3 b	20,0 b	18,7 b	32,2 ab
ohne Brennen [4]	11,0 a	11,0 ⁺	13,4 a	20,5 ab	24,7 a	31,1 a	29,1 a	34,4 b
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	18,1 b	17,8 b	27,6 ab
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	21,9 ab	30,4 ab

¹ bezieht sich auf die Behandlungen 2, 3, 5

² in den Behandlungen 2, 4, 5

[] Nr. der Behandlung

+ Wert des vorangegangenen Probenahmetermins übernommen

* gleich Wert des traditionellen Anbausystems am gleichen Probenahmetermin

Anhang 8b Vergleich der enzymatischen Aktivitäten im Boden (10-20 cm) der 3-4-jährigen Brache (Referenz), des traditionellen Anbausystems und modifizierten Anbausystemen, Tukey-Test ($p < 0,05$) der verschiedenen Systeme ein und derselben Probenahme, Cumarú

Tage nach dem Brennen	0	6	27	79	112	164	248	454
	am Tag des Brennens ¹	nach dem Brennen ¹	erste leichte Regenfällen	nach Maissaat u. Maniokpflanzen Beginn Regenzeit	männliche Maisblüte	Ernte Mais	Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	Ernte Maniok ²
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	1343 a	+	1494 a	1200 a	1105 a	1279 a	1154 a	1016 a
traditioneller Anbau [2]	1498 b	1432	1598 a	1111 a	1096 a	1270 a	1099 a	911 a
ohne Brennen [4]	1442 ab	+	1516 a	1132 a	1151 a	1285 a	1071 a	968 a
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	1345 a	1114 a	961 a
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	1069 a	967 a
Urease ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} 2 \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	12,9 a	+	4,8 a	13,4 a	15,0 a	16,1 a	18,4 a	21,2 a
traditioneller Anbau [2]	15,3 ab	14,7	10,8 b	12,9 a	17,2 a	17,1 a	18,7 a	20,7 a
ohne Brennen [4]	17,0 b	+	10,2 ab	12,7 a	14,6 a	14,6 a	17,9 a	19,3 a
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	15,4 a	18,6 a	21,8 a
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	20,1 a	22,7 a
β -Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)								
Brache (Referenz) [1]	7,7 a	+	9,5 a	9,2 a	23,6 a	11,7 a	9,7 a	9,5 a
traditioneller Anbau [2]	7,8 a	7,7	7,2 a	8,3 a	14,3 b	12,5 a	11,7 a	11,0 a
ohne Brennen [4]	7,7 a	+	7,8 a	8,8 a	24,8 a	11,0 a	10,1 a	10,8 a
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	*	*	10,1 a	8,0 a	13,0 a
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	*	*	11,2 a	11,0 a

¹ bezieht sich auf die Behandlungen 2, 3, 5

² in den Behandlungen 2, 4, 5

[] Nr. der Behandlung

+ Wert des vorangegangenen Probenahmetermins übernommen

* gleich Wert des traditionellen Anbausystems am gleichen Probenahmetermin

Anhang 8c Vergleich der enzymatischen Aktivitäten im Boden (0-10 cm) der 3-4-jährigen Brache (Referenz), des traditionellen Anbausystems und modifizierten Anbausystemen, Iracema

Tage nach dem Brennen	0 unmittelbar vor dem Brennen ¹	1 kurz nach dem Brennen ¹	50 Beginn der Regenzeit vor Maissaat	155 Ernte Mais	238 Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	439 Ernte Maniok ²
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	1655	+	1536	1803	2091	1558
traditioneller Anbau [2]	1730	1530	1135	1248	1286	1026
ohne Brennen [4]	1755	+	1483	1562	1276	900
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	1193	1559	1262
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	1340	1038
Urease ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} 2 \text{ h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	-	-	-	28,0	24,5	31,3
traditioneller Anbau [2]	-	-	-	22,4	23,5	29,6
ohne Brennen [4]	-	-	-	25,5	26,0	26,2
+ <i>Vigna</i> [3]	-	-	-	21,3	26,3	30,3
+ <i>Canavalia</i> [5]	-	-	-	*	23,4	27,1
β-Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{ h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	19,9	+	20,8	24,5	23,3	20,5
traditioneller Anbau [2]	19,4	18,7	12,3	16,0	23,4	20,5
ohne Brennen [4]	17,5	+	17,0	27,7	15,0	22,6
+ <i>Vigna</i> [3]	*	*	*	17,3	30,1	23,2
+ <i>Canavalia</i> [5]	*	*	*	*	18,0	21,2

¹ bezieht sich auf die Behandlungen 2, 3, 5

² in den Behandlungen 2, 4, 5

[] Nr. der Behandlung

+ Wert des vorangegangenen Probenahmetermins übernommen

* gleich Wert des traditionellen Anbausystems am gleichen Probenahmetermin

Anhang 8d Vergleich der enzymatischen Aktivitäten im Boden (10-20 cm) der 3-4-jährigen Brache (Referenz), des traditionellen Anbausystems und modifizierten Anbausystemen. Iracema

Tage nach dem Brennen	0 unmittelbar vor dem Brennen ¹	1 kurz nach dem Brennen ¹	50 Beginn der Regenzeit vor Maissaat	155 Ernte Mais	238 Ernte <i>Vigna</i> , letztes Hacken	439 Ernte Maniok ²
saure Phosphatase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	-	-	-	1636	1789	1346
traditioneller Anbau [2]	-	-	-	1708	1741	1331
ohne Brennen [4]	-	-	-	1623	1688	1295
+ <i>Vigna</i> [3]	-	-	-	1639	1649	1240
+ <i>Canavalia</i> [5]	-	-	-	*	1689	1322
Urease ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} 2 \text{h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	-	-	-	14,2	15,4	27,0
traditioneller Anbau [2]	-	-	-	15,5	16,1	22,1
ohne Brennen [4]	-	-	-	15,9	15,4	24,7
+ <i>Vigna</i> [3]	-	-	-	14,4	15,7	21,0
+ <i>Canavalia</i> [5]	-	-	-	*	15,9	25,4
β-Glucosidase ($\mu\text{g p-NP g TS}^{-1} \text{h}^{-1}$)						
Brache (Referenz) [1]	-	-	-	10,6	7,5	7,0
traditioneller Anbau [2]	-	-	-	10,0	9,7	10,1
ohne Brennen [4]	-	-	-	9,5	8,6	7,1
+ <i>Vigna</i> [3]	-	-	-	9,9	8,6	8,5
+ <i>Canavalia</i> [5]	-	-	-	*	10,2	8,6

¹ bezieht sich auf die Behandlungen 2, 3, 5

² in den Behandlungen 2, 4, 5

[] Nr. der Behandlung

+ Wert des vorangegangenen Probenahmetermins übernommen

* gleich Wert des traditionellen Anbausystems am gleichen Probenahmetermin

Anhang 9 Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus in Cumarú (in Abb. 30 sind die Funktionen 1 und 2 dargestellt)

Anhang 9a Rohkoeffizienten für die kanonischen Variablen der Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus in Cumarú

	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5
saure Phosphatase	-0,0005	0,0099	0,0049	0,0016	-0,0044
β -Glucosidase	0,1606	-0,0801	-0,0407	0,1133	0,0651
pH(CaCl ₂)	-1,4551	4,3044	-1,9140	0,6447	-2,7825
P _i	0,0950	-0,0813	0,0564	0,3553	-0,0542
C _{org}	3,8205	-0,9337	-1,1956	4,2002	-0,5246
N _t	8,0975	-50,8446	1,6502	-73,5738	-78,8438
Ca + Mg	-1,0749	-3,2925	3,6693	-1,3861	1,4203
K	-93,4736	49,5026	-53,1768	-9,6922	-1,3632
H	-0,6106	-0,3771	-1,8460	-0,7402	0,7584
Konstante	8,0929	-18,1688	8,0080	-1,5056	20,6961
Eigenwert	23,2264	11,5174	4,4694	2,7356	0,2070
kumul. Wahrscheinlichkeit	0,5510	0,8242	0,9302	0,9951	1,0000

Anhang 9b Standardisierte Koeffizienten für die kanonischen Variablen der Diskriminanzanalyse des traditionellen Anbaus in Cumarú

	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5
saure Phosphatase	-0,0613	1,1996	0,5936	0,1923	-0,5255
β -Glucosidase	0,7101	-0,3541	-0,1801	0,5012	0,2878
pH(CaCl ₂)	-0,3350	0,9909	-0,4406	0,1484	-0,6405
P _i	0,2313	-0,1981	0,1372	0,8651	-0,1319
C _{org}	0,6502	-0,1589	-0,2035	0,7148	-0,0893
N _t	0,0803	-0,5044	0,0164	-0,7299	-0,7822
Ca + Mg	-0,3185	-0,9755	1,0871	-0,4107	0,4208
K	-1,0062	0,5329	-0,5724	-0,1043	-0,0147
H	-0,2221	-0,1372	-0,6715	-0,2692	0,2759
Eigenwert	23,2264	11,5174	4,4694	2,7356	0,2070
kumul. Wahrscheinlichkeit	0,5510	0,8242	0,9302	0,9951	1,0000

Anhang 10 Diskriminanzanalyse von Flächen in Cumarú und Iracema unter Berücksichtigung aller relevanten Bodenparameter

Anhang 10a Quadrierte Mahalanobis Distanzen der Diskriminanzanalyse von Flächen in Cumarú (Abb. 31a)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	24,819	50,486	134,685	19,306	34,798	27,327
Maniokernte		35,745	115,894	3,020	9,778	4,701
5-j. Brache			32,169	31,556	20,419	26,381
8-j. Brache				104,777	76,188	98,618
Anbau mit <i>Vigna</i>					11,5655	2,2995
Anbau ohne Brennen						11,205

Anhang 10b Wahrscheinlichkeitsniveaus für die Unterschiedlichkeit von Flächen im paarweisen Vergleich. Cumarú (Abb. 31a)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000
Maniokernte		0,0000	0,0000	0,6063	0,0196	0,2891
5-j. Brache			0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
8-j. Brache				0,0000	0,0000	0,0000
Anbau mit <i>Vigna</i>					0,0076	0,7712
Anbau ohne Brennen						0,0092

Anhang 10c Zusammenfassung der Diskriminanzanalyse. Cumarú (Abb. 31a)

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (6,34)	p-level	Toler.	1-Toler. (R-Sqr.)
s. Phosphatase	0,0256	0,2186	20,2540	0,0000	0,5918	0,4082
Urease	0,0070	0,7959	1,4532	0,2237	0,4678	0,5322
β -Glucosidase	0,0069	0,8098	1,3311	0,2705	0,8431	0,1569
pH(CaCl ₂)	0,0086	0,6482	3,0755	0,0163	0,4569	0,5431
P _i	0,0076	0,7363	2,0295	0,0886	0,6647	0,3353
C _{org}	0,0065	0,8566	0,9490	0,4737	0,4418	0,5582
N	0,0070	0,7940	1,4701	0,2179	0,4623	0,5377
Ca+Mg	0,0080	0,7036	2,3873	0,0494	0,3323	0,6677
K	0,0080	0,7000	2,4286	0,0462	0,5841	0,4159

Wilks' Lambda: 0,00560 approx. F (54,177)=5.8165 p< 0,0000

Anhang 10d Quadrierte Mahalanobis Distanzen der Diskriminanzanalyse von Flächen in Iracema (Abb. 31b)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	92,350	184,412	263,291	57,927	102,563	94,244
Maniokernte		30,986	67,830	6,802	9,789	1,378
5-j. Brache			9,047	46,234	17,608	24,967
8-j. Brache				90,970	44,264	61,142
Anbau mit <i>Vigna</i>					11,789	7,007
Anbau ohne Brennen						7,947

Anhang 10e Wahrscheinlichkeitsniveaus für die Unterschiedlichkeit von Flächen im paarweisen Vergleich. Iracema (Abb. 31b)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maniokernte		0,0000	0,0000	0,0963	0,0190	0,9408
5-j. Brache			0,0284	0,0000	0,0004	0,0000
8-j. Brache				0,0000	0,0000	0,0000
Anbau mit <i>Vigna</i>					0,0065	0,0862
Anbau ohne Brennen						0,0517

Anhang 10f Zusammenfassung der Diskriminanzanalyse. Iracema (Abb. 31b)

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (6,34)	p-level	Toler.	1-Toler. (R-Sqr.)
s. Phosphatase	0,0330	0,2400	17,9478	0,0000	0,5341	0,4659
Urease	0,0099	0,8036	1,3852	0,2488	0,5261	0,4739
β -Glucosidase	0,0120	0,6591	2,9311	0,0205	0,6642	0,3358
pH(CaCl ₂)	0,0123	0,6441	3,1313	0,0149	0,5962	0,4038
P _i	0,0098	0,8160	1,2777	0,2935	0,8804	0,1196
C _{org}	0,0104	0,7618	1,7718	0,1346	0,5121	0,4879
N	0,0100	0,7942	1,4683	0,2185	0,4457	0,5543
Ca+Mg	0,0094	0,8436	1,0508	0,4107	0,5163	0,4837
K	0,0096	0,8276	1,1807	0,3397	0,7908	0,2092

Wilks' Lambda: 0,00792 approx. F (54,177)=5.2166 p< 0,0000

Anhang 11 Diskriminanzanalyse von Flächen in Cumarú und Iracema unter Beschränkung auf die Bodenparameter 'saure Phosphatase' und 'pH(CaCl₂)'

Anhang 11a Quadrierte Mahalanobis Distanzen der Diskriminanzanalyse von Flächen in Cumarú unter alleiniger Berücksichtigung der sauren Phosphatase und des pH-Wertes (Abbildung 32a)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	13,505	33,095	95,090	10,698	18,835	17,616
Maniokernte		15,742	69,321	0,167	3,473	0,348
5-j. Brache			19,154	15,866	4,427	13,244
8-j. Brache				69,870	41,829	63,169
Anbau mit <i>Vigna</i>					3,625	0,895
Anbau ohne Brennen						2,478

Anhang 11b Wahrscheinlichkeitsniveaus für die Unterschiedlichkeit von Flächen im paarweisen Vergleich unter alleiniger Berücksichtigung der sauren Phosphatase und des pH-Wertes. Cumarú (Abbildung 32a)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maniokernte		0,0000	0,0000	0,7839	0,0105	0,6041
5-j. Brache			0,0000	0,0000	0,0035	0,0000
8-j. Brache				0,0000	0,0000	0,0000
Anbau mit <i>Vigna</i>					0,0088	0,2804
Anbau ohne Brennen						0,0352

Anhang 11c Zusammenfassung der Diskriminanzanalyse unter alleiniger Berücksichtigung der sauren Phosphatase und des pH-Wertes. Cumarú (Abbildung 32a)

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (6,34)	p-level	Toler.	1-Toler. (R-Sqr.)
s. Phosphatase	0,3087	0,1359	43,441	0,0000	0,9685	0,0315
pH(CaCl ₂)	0,1011	0,4149	9,635	0,0000	0,9685	0,0315

Wilks' Lambda: 0,04196 approx. F (12,82)=26,525 p< 0,0000

Anhang 11d Quadrierte Mahalanobis Distanzen der Diskriminanzanalyse von Flächen in Iracema unter alleiniger Berücksichtigung der sauren Phosphatase und des pH-Wertes (Abbildung 32b)

	traditioneller Anbau			Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
	Maniok-ernte	5-j. Brache	8-j. Brache			
semiperman. Anbau	45,831	102,446	150,878	29,146	58,693	45,222
Maniokernte		18,272	44,233	2,224	6,548	0,075
5-j. Brache			5,655	25,058	6,066	16,906
8-j. Brache				53,874	21,909	42,117
Anbau mit <i>Vigna</i>					7,444	1,876
Anbau ohne Brennen						5,314

Anhang 11e Wahrscheinlichkeitsniveaus für die Unterschiedlichkeit von Flächen im paarweisen Vergleich unter alleiniger Berücksichtigung der sauren Phosphatase und des pH-Wertes. Iracema (Abbildung 32b)

	traditioneller Anbau					
	Maniok- ernte	5-j. Brache	8-j. Brache	Anbau mit <i>Vigna</i>	Anbau ohne Brennen	Anbau mit <i>Canavalia</i>
semiperman. Anbau	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Maniokernte		0,0000	0,0000	0,0485	0,0004	0,8959
5-j. Brache			0,0009	0,0000	0,0006	0,0000
8-j. Brache				0,0000	0,0000	0,0000
Anbau mit <i>Vigna</i>					0,0002	0,0757
Anbau ohne Brennen						0,0013

Anhang 11f Zusammenfassung der Diskriminanzanalyse. Iracema (Abbildung 32b)

	Wilks' Lambda	Partial Lambda	F-remove (6,34)	p-level	Toler. Toler.	1-Toler. (R-Sqr.)
s. Phosphatase	0,4728	0,0738	85,757	0,0000	0,9773	0,0227
pH(CaCl ₂)	0,0716	0,4875	7,185	0,0000	0,9773	0,0227

Wilks' Lambda: 0,03489 approx. F (12,82)=29.750 p< 0,00000

Anhang 12 Interaktionen zwischen den biologischen Parametern

Korrelationskoeffizienten (Pearson) der biologischen Parameter in der Bodentiefe 0-5 cm der Chronosequenz *Cumarú* (n=20)

	saure Phosphatase	Urease	β -Glucosidase	basische Phosphatase	Dehydrogenase	C_{mik}	C_{mik}/C_{org}	P_{mik}	CO_2i	qCO_2
C_{org}	0,591**	0,540*	0,590**	0,748***	0,645**	0,563*	ns	0,592**	0,665***	ns
saure Phosphatase		0,825***	ns	0,823***	0,628**	0,641**	ns	0,574**	0,864***	ns
Urease			0,555*	0,772***	0,669***	0,831***	0,651**	0,754***	0,702***	-0,533*
β -Glucosidase				0,650**	0,550*	ns	ns	0,511*	0,534*	ns
bas. Phosphatase					0,787***	0,608**	ns	0,668***	0,778***	ns
Dehydrogenase						0,602**	ns	0,632**	0,630**	ns
C_{mik}							0,746***	0,786***	0,652**	-0,694***
C_{mik}/C_{org}								ns	ns	-0,701***
P_{mik}									0,633**	ns
CO_2i										ns
n		20	20	20	20	18	18	20	20	18

Danksagung

Vorab gilt mein herzlicher Dank Prof. P.L.G. Vlek für die Überlassung des Themas und sein fortwährendes Interesse an meiner Arbeit. Prof. Claassen möchte ich danken für die Übernahme des Korreferats, Prof. Stein für die Ratschläge bezüglich der statistischen Analysen. Ferner möchte ich den Mitarbeitern des SHIFT-Projektes am CPATU in Belém und in Göttingen danken, insbesondere Dr. Manfred Denich und Dr. Milton Kanashiro. Sie haben durch ihr Engagement zum Gelingen des Projektes und damit auch dieser Arbeit beigetragen.

Zu danken habe ich auch Célia Maria Braga Sarmiento für ihre Ausdauer bei den Laboranalysen in Belém, Mauro José dos Santos da Silva und Izaias Nascimento Leite für die Hilfe im Labor sowie Raimundo Gonzaga (Cumarú) und Airton Neves (Iracema) für ihre Arbeit im Feld. Meinen Dank auch an Elizabeth Ying Chu und Martina Löding.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank Malte und Heike, durch deren Geduld und Verständnis das Gelingen dieser Arbeit erst möglich wurde.

Diese Studie wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Projektes „Sekundärwald und Brachevegetation in der Kulturlandschaft des östlichen Amazonasgebietes - Funktion und Manipulierbarkeit“ (Fördernummer 39389 A) gefördert.

From cooperation between the University of Göttingen, Germany, and the Centro de Pesquisa Agroflorestral da Amazônia Oriental (EMBRAPA/CPATU), Belém, Pará, Brazil, under the Governmental Agreement on Cooperation in the field of scientific research and technological development between Germany and Brazil.