UNIVERSITÄT HOHENHEIM
INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG

Prof. Dr. V. Römheld & Dr. Andreas Bürkert
Prof. Dr. Klaus Becker

Universität Hohenheim (330), D-70593 Stuttgart
Telefon: 0711 459-2344; Telefax: 0711 459-3295
Email: plantnut@uni-hohenheim.de

Eiselen Stiftung Ulm
z.H. Herrn
Senator e.h. e.h.
Dr. Hermann Eiselen
Fürsteneckerstr. 17
89077 **Ulm**

Hohenheim / Niamey, den 21. September 1998

ABSCHLUSSBERICHT

für das im Rahmen der Projektförderung der Eiselen-Stiftung Ulm bewilligte Forschungsprojekt:

'Einfluß von Düngungsmaßnahmen in agro-pastoralen Rotationssystemen des südlichen Niger auf die Human- und Tierernährung'

Antragsteller: Dr. V. Römheld, o. Professor
in Nachfolge Prof. Dr. Dres. h.c. H. Marschner
Dienstanschrift:
Institut für Pflanzenernährung (330)
Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart
Tel.: 0711/459-2344 Fax: 0711/459-3295
Privatanschrift:
Blumhardtstr. 4
70599 Stuttgart-Steckfeld
Tel.: 0711 - 456670

und: Dr. Klaus Becker, o. Professor
Dienstanschrift:
Institut für Tierproduktion in den Tropen und Subtropen (480)
Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart
Tel.: 0711/459-3158 Fax: 0711/459-3702
Privatanschrift:
August Zittelmann Str. 59
72622 Nürtingen
Tel.: 07022 - 372.41

Einfluß von Düngungsmaßnahmen in agro-pastoralen Rotationssystemen des südlichen Niger auf die Human- und Tierernährung

Berichterstatter: A. Bürkert, K. Becker und V. Römheld

1 Zusammenfassung

Gegenstand des hiermit abgeschlossenen Forschungsvorhabens war einserseits die Weiterentwicklung eines unter bäuerlichen Bedingungen durchführbaren effizienten Verfahrens zur dauerhaften Ertragssteigerung bei Perlhirse (*Pennisetum glaucum*), Sorghum (*Sorghum bicolor*) und Mais (*Zea mays*) in Westafrika und andererseits die Prüfung genotypischer Unterschiede bei human- und tierernährerisch relevanten Qualitätsparametern im Hirsekorn und -stroh.

Die in den Jahren 1997 und 1998 an acht Versuchsstandorten entlang eines Niederschlagsgradienten von 510 bis 1300 mm eingesetzte plazierte Phosphatdüngung in Höhe von 4 kg P ha^{-1} als gemahlenes NPK ins Saatloch führte im Vergleich zur Kontrolle ohne Phosphatdüngung zu beträchtlichen Erhöhungen des Gesamttrockenmasseertrages, die in 1997 bei durchschnittlich 66% lagen. Ähnliche Ertragssteigerungen zeigten sich auch auf den Feldern von 250 Kleinbauern, die diese einfache Technik unter ihren Bedingungen testeten. Es stellte sich heraus, daß die Effekte einer derartigen Startdüngung mit leichtlöslichem Mineraldünger bei gleichzeitiger Grunddüngung mit preiswertem, lokal verfügbarem, aber schwer löslichem Rohphosphat additiv sind. Die frühe Zufuhr löslicher Nährstoffe führt über eine Steigerung des Wurzelwachstums der Jungpflanzen auch zu einer besseren Ausnutzung des Rohphosphates. Vor diesem Hintergrund und bei den derzeit hohen bzw. sogar noch steigenden Preisen für Getreide in Westafrika scheinen die Chancen für eine breite Übernahme der entwickelten plazierten Düngungstechnik in die kleinbäuerlichen Subsistenzsysteme der Region besonders günstig.

Die Qualitätsuntersuchungen bei den verschiedenen Hirsegenotypen zeigten eine beträchtliche genetisch bedingte Variabilität bei allen analysierten Parametern im Korn- und Sproßmaterial. Dabei wurde allerdings auch deutlich, daß das dem untersuchten Material zugrundeliegende Züchtungsprogramm für Hirse-Hybriden dieser Variabilität in den Qualitätsparametern bisher offensichtlich nur unvollkommen Rechnung getragen hat. So zeigten die traditionellen Landsorten, und in einigen der untersuchten Parametern auch die Normalsorten, im Vergleich zu den Hybriden deutlich bessere human- und tierernährerische Eigenschaften, vor allem hinsichtlich ihres höheren Protein- und Spurenelementgehaltes im Korn, aber auch wegen ihrer besseren Verdaulichkeit und größeren verfügbaren Gesamtenergiemenge pro Flächeneinheit im Sproßmaterial (Hirsestroh). Insgesamt scheint eine stärkere Einbeziehung human- und tierernährerischer Qualitätskriterien in laufende Züchtungsprogramme vor dem Hintergrund der vorherrschenden kleinbäuerlichen, agro-pastoralen Betriebsausrichtung durchaus wünschenswert und auch erreichbar.

2 Zielsetzung der Forschungsarbeiten

Zielsetzung des ursprünglichen Antrages war es, den Einfluß einer Phosphatdüngung auf das humanernährerisch bedeutsame Phytat/Zinkverhältnis im Hirsekorn und die Produktion von eiweißreichem Ergänzungsfutter (Augenbohnenheu) für Wiederkäuer zu prüfen. Kurz vor Antragsbewilligung konnten jedoch bereits umfangreiche Voruntersuchungen zum Einfluß einer Phosphatdüngung auf den Zink- und Phytatgehalt im Hirsekorn abgeschlossen werden (Buerkert *et al.*, 1998). Diese zeigten zwar eine eindeutige Verschlechterung des Phytat/Zinkverhältnisses nach breitwürfiger Phosphatdüngung, aber auch, daß die humanernährerische Bedeutung dieser Verschlechterung ganz entscheidend von den bäuerlichen Zubereitungstechniken, insbesondere der Schälung des Getreides und der Fermentation des Mahlgutes, abhängt. Weiter offen schien allerdings, inwieweit der Gehalt an Schwermetallen in Rohphosphaten, so beispielweise von Cadmium im Togo-Phosphat auf den sauren westafrikanischen Böden zu einer humanphysiologisch bedenklichen Erhöhung des Cadmiumgehaltes in Getreidekörnern führen könnte. Neue Untersuchungen von Werner und Warnusz (1997) zum Einfluß langjähriger Klärschlammanwendung auf den Gehalt an Schwermetallen in deutschem Getreide lassen dies jedoch auch bei Perlhirse als sehr unwahrscheinlich erscheinen.

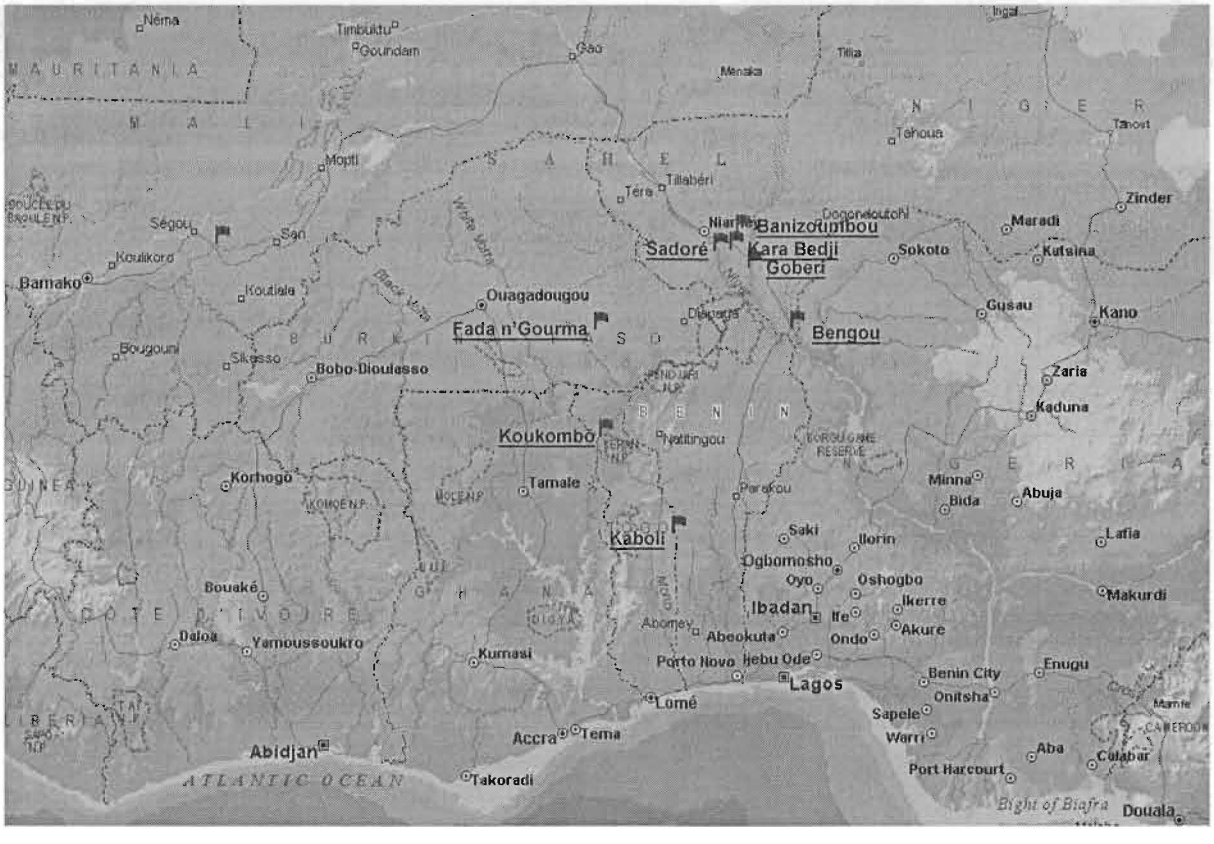

Abbildung 1. Lage der acht Untersuchungsstandorte (Namen unterstrichen) in Westafrika. Kartenmaterial aus Microsoft Encarta®.

Angesichts dieses Kenntnisstandes erschien es sinnvoll, im Rahmen des ursprünglichen Antrags die Schwerpunkte der Untersuchungen wie folgt zu modifizieren:

- Weiterentwicklung und Praxiserprobung einer unter bäuerlichen Bedingungen einfach anwendbaren Technik zur nachhaltigen Ertragserhöhung bei Getriede (Perlhirse, *Pennisetum glaucum*; Sorghum, *Sorghum bicolor*; Mais, *Zea mays*) und Leguminosen (Augenbohne, *Vigna unguiculata*; Erdnuß, *Arachis hypogaea*) durch plazierte Phosphatdüngung.
- Prüfung und Quantifizierung genotypischer Unterschiede in der humanphysiologisch relevanten Kornqualität und der tierphysiologisch bedeutsamen Strohqualität verschiedener Hirsesorten.

3 Standorte und Versuchsanlagen

Antragsgemäß wurden die Untersuchungen zur Wirkung einer gering dosierten aber in Samennähe plazierten Phosphatdüngung zur Saat (mit dem bisher nur in Reisfeldern entlang des Niger-Flußes verwandten NPK-Mineraldünger 15-15-15) in umfangreichen Feldversuchen an insgesamt acht Standorten durchgeführt. Fünf Standorte (Banizoumbou, Sadoré, Kara Bedji, Goberi und Gaya mit Hirse und Augenbohne) lagen in Niger, einer (Fada-Kouaré mit Sorghum und Erdnuß) in Burkina Faso und zwei Standorte (Koukombo und Kaboli mit Mais und Erdnuß) in Togo (Abbildung 1). Sie umfaßten einen Niederschlagsgradienten von 510 bis 1300 mm mit sehr verschiedenen Bodeneigenschaften (Tabellen 1 und 2). Darüberhinaus wurden an einzelnen Standorten bereits im Jahre 1997 zusätzliche 'on-farm' Tests durchgeführt, die im Jahre 1998 über Kontakte zu Organisationen der Entwicklungshilfe auf mehr als 250 Bauern in vier Zonen des Landes Niger ausgedehnt werden konnten.

Für die Untersuchungen zur Kornqualität verschiedener Hirsesorten wurde auf die Bestände des ICRISAT Sahelian Center in Niamey (Niger) zurückgegriffen. Um den Einfluß von Züchtungsmaßnahmen auf die Kornqualität beurteilen zu können, wurden 22 bäuerliche Landsorten aus ganz Niger, 22 Normalsorten und zwei Gruppen (A und B) mit jeweils 6 und 4 Testhybriden aus dem ICRISAT Züchtungsprogramm ausgewählt. Alle Genotypen waren standardmäßig in der Trockenzeit unter Bewässerung auf 10 x 2 m großen Parzellen bei einer Bestandesdichte von 16.667 Pflanzstellen ha^{-1} vermehrt und mit 30 kg Stickstoff ha^{-1} als NPK (15-15-15) vor der Saat und 13 kg N ha^{-1} als Kalkammonsalpeter zum Schossen gedüngt worden.

Durchgeführt wurden Mineralstoffanalysen insbesondere zum Gehalt an Protein, Phytat, wichtigen Spurenelementen (Zink, Zn; Eisen, Fe; Kupfer, Cu) sowie Calcium (Ca) und Magnesium (Mg). Anderseits wurden *in vitro* Untersuchungen zur Dynamik der Energiefreisetzung und zum ß-Carotin-Gehalt im Hirsekorn für den Bereich Humanernährung und Analysen zur Energiefreisetzung an den im traditionellen bäuerlichen System von Wiederkäuern gefressenen Sproßteilen (Stengel und Blätter) unterschiedlicher Position für den Bereich Tierernährung vorgenommen.

Tabelle 1. Mittlerer Jahresniederschlag (im langjährigen Mittel) und chemische Bodenparameter (0 bis 0.2 m Tiefe) an sechs Standorten in Westafrika im Mai 1995. Quelle: Buerkert, unveröffentlicht.

Standort	Niederschlag mm	pH [1]	C_{org} %	Bray-P mg kg^{-1}	H_2O-P µg kg^{-1}	Ca^{2+} – cmol kg^{-1} –	CEC_e [2]	BS [3] %	N_{min} mg kg^{-1}
Banizoumbou	510	4.4	0.15	1.5	300	0.4	0.8	74	5
ISC-Sadoré	560	4.5	0.23	2.8	440	0.4	1.1	86	n.a.
Kara Bedji	590	4.2	0.16	1.9	130	0.2	0.8	55	4
Goberi	600	4.1	0.16	1.7	280	0.2	0.8	49	2
Gaya	800	4.2	0.33	2.5	150	0.4	1.3	64	9
Fada-Kouaré	850	5.4	0.52	1.3	320	1.8	2.8	99	3
Koukombo	1100	5.1	0.26	0.8	n.v.	1.3	1.9	98	n.v.
Kaboli	1300	4.8	0.63	4.6	n.v.	1.3	1.6	96	n.v.

(1) pH in 0.01 *M* KCl (1:25)
(2) Effektive Kationenaustauschkapazität
(3) Basensättigung
n.v. = nicht verfügbar

Tabelle 2. Behandlungsvarianten (Großparzellen) in den Phosphat- und Rotationsversuchen in Westafrika (Düngerraten in kg ha^{-1}). Quelle: Buerkert, unveröffentlicht.

N	CR	Kontrolle	$SSP_{13\ breit}$	TPR_{39}	$P_{4\ plaziert}$	TPR_{39} $+P_{4\ plaziert}$	KPR_{130}	TPR_{130} $+P_{4\ plaziert}$	KPR_{130} $+P_{4\ plaziert}$
0	500	X	X	X	X	X	X	X	X
0	2000	X	X	X		X			
30	500	X	X	X		X			
30	2000	X	X	X		X			

Legende:

CR_{500} = Ernterückstände in traditionell bäuerlicher Menge (Kontrolle)
SSP = Superphosphat
TPR = Rohphosphat aus Tahoua/Tilemsi (weicherdig)
KPR = Rohphosphat aus Kodjari/Hahotoé ('harterdig')
breit = breitwürfig
$P_{plaziert}$ = plazierte Ausbringung von NPK zur Saat

Es handelt sich um insgesamt 20 P-Behandlungsvarianten in vierfacher Wiederholung.

Jede Großparzelle (10 x 10 m) war unterteilt in vier Unterparzellen mit (a) Dauerkultur Getreide, (b) Getreide in Rotation mit Leguminosen, (c) Leguminosen in Rotation mit Getreide, (d) Dauerkultur Leguminosen.

4 Ertragswirksamkeit der plazierten Phosphatdüngung bei Getreide und Leguminosen

Grundlage dieses ersten Arbeitsteiles waren die bisher vorliegenden Arbeiten zur stark ertragsfördernden Wirkung von mineralischen Phosphatdüngemitteln in der sahelischen und sudanischen Zone Westafrikas. So kann eine breitwürfige Phosphatdüngung mit importiertem Single Superphosphat (SSP) bei Hirse zu Ertragssteigerungen um das zwei- bis dreifache führen (Bationo und Mokwunye, 1991). Auch die Applikation von Rohphosphaten einheimischer Lagerstätten (McClellan und Notholt, 1986) kann zu deutlichen Ertragsverbesserungen führen, die teilweise sogar ähnlich hoch sein können wie bei Superphosphat (Bationo *et al.*, 1990, 1992). Allerdings hängen diese sehr stark von Standortfaktoren wie Boden-pH und Niederschlägen ab (Buerkert and Hiernaux, 1998) sowie von der Löslichkeit der angewandten Rohphosphate ('weicherdiges' Tahoua-Phosphat *versus* 'harterdiges' Burkina-Phosphat). Trotz dieser starken Ertragswirksamkeit ist die Anzahl der Bauern, die eine breitwürfige Phosphatdüngung zu Hirse anwenden, jedoch verschwindend klein, weil die Investitionskosten bei vergleichsweise geringen Hirsepreisen zu hoch sind und die Verfügbarkeit großer Mineraldüngermengen zu Vegetationsbeginn oft begrenzt ist.

Vor diesem Hintergrund war zunächst versucht worden, durch Pillierung des Hirse-Saatgutes mit Ammoniumphosphat in der Aufwandmenge von 100 g P ha^{-1} (Rebafka *et al.*, 1993) oder durch die Plazierung von 0.5 kg P ha^{-1} als SSP ins Saatloch (Buerkert, 1995) eine Alternative zur breitwürfigen Ausbringung größerer Düngermengen zu entwickeln. Unter Feldbedingungen zeigte sich jedoch rasch, daß angesichts einer Gesamten Phosphatgesamtaufnahme der Hirse in Höhe von etwa 4 kg P ha^{-1} diese Startdüngung zwar zu einer rascheren Jugendentwicklung aber nur zu einem etwa 10% höheren Trockenmasseertrag zur Ernte führte. Eine Erhöhung der SSP-Startdüngung auf 3, 5 und 7 kg P ha^{-1} führte zwar zu einer Steigerung des Hirse-Endertrages um 60%, erforderte aber eine arbeitsaufwendige, seitliche Plazierung des Mineraldüngers, um Verbrennungsschäden an den Keimwurzeln zu vermeiden (Muehlig-Versen *et al.*, 1997).

In den Jahren 1997 und 1998 wurde deshalb an den acht Versuchsstandorten in Westafrika eine Startdüngung zur Saat in Höhe von 4 kg P ha^{-1} als NPK geprüft. Dabei führte das Mahlen des Mineraldüngers in den ortsüblichen Getreidemörsern zu einer Vermeidung von Keimschäden. Die mit der NPK-Applikation neben dem Phosphat zugeführte Menge von 9 kg Stickstoff (davon die Hälfte als wurzelwachstumsstimulierendes Ammonium) und 7.5 kg Kalium führte im Vergleich zur Kontrolle ohne Phosphatdüngung zu einem bis zur Ernte anhaltenden Wachstumsschub, der nicht nur das Wachstum von Hirse, Sorghum und Mais deutlich erhöhte (in 1997 standortabhängig zwischen 31 und 173%, Tabelle 3), sondern noch um bis zu 10 Tage beschleunigte (Abbildung 2).

Aus bäuerlicher Sicht sind diese durch die Mineraldüngung ausgelöste Vorverlegung des Erntetermins hochwillkommen, da sie in der Regel zu einem wesentlich höheren Verkaufspreis bzw. einem früheren Ende der Zukaufperiode führt und damit zu einer Verbesserung der Ernährungssituation bei Subsistenzbauern beiträgt. Die Effekte einer Startdüngung mit leichtlöslichem Mineraldünger sind bei gleichzeitiger Grunddüngung mit Rohphosphat additiv, d.h. die frühe Zufuhr löslicher Nährstoffe führt über eine

Steigerung des Wurzelwachstums der Jungpflanzen auch zu einer besseren Ausnutzung des lokalen Rohphosphates.

Auch bei den Leguminosen Augenbohne und Erdnuß führte die gleiche Düngungsmaßnahme, allerdings erst nach dem Auflaufen der Pflanzen durchgeführt, zu deutlichen Erhöhungen der Gesamttrockenmasse. Diese schwankten allerdings standortsabhängig zwischen 5 und 172%.

Die aufbauend auf diesen Ergebnissen in 1998 durchgeführten 'on-farm' Tests mit über 250 Bauern um Sadoré (Initiative eines privaten Händlers), Say (Landwirtschaftsdienst der nigrischen Regierung), Maradi (SIM-Entwicklunsgprojekt) und Zinder (FAO - Niger) bestätigten die unter kontrollierten Bedingungen gewonnenen Ergebnisse in vollem Umfang. Die plazierte Phosphatdüngung hat damit sehr gute Chancen von den Subsistenzbauern der Region langfristig übernommen zu werden und zu einer Verbesserung der Ernährungslage der bäuerlichen Bevölkerung im Sahel beizutragen.

Tabelle 3. Einfluß breitwürfiger Phosphatdüngung mit 13 kg P ha^{-1} als Single Superphosphat (SSP_{13}) und 39 kg P ha^{-1} als Rohphosphat alle drei Jahre (RP_{39}), einer plazierten NPK-Düngung in Höhe von 4 kg P ha^{-1} ins Pflanzloch (NPK_4) und der Kombination von Rohphosphat und plazierter NPK-Düngung ($RP_{39}+NPK_4$) auf die Gesamttrockenmasse-Entwicklung von Hirse, Sorghum und Mais an acht Standorten in Westafrika (1997). Die Daten zeigen Relativerträge im Vergleich zur Kontrolle ohne Phosphatdüngung. Quelle: Buerkert und Hiernaux, 1998.

Standort	Kontrollertrag kg ha^{-1}	SSP_{13}	RP_{39}	NPK_4	$RP_{39}+NPK_4$
		(%) des Kontrollertrages			
Banizoumbou [1]	1840	192	133	152	190
ISC-Sadoré [1]	1570	219	138	n.v.	186
Kara Bedji [1]	2310	226	97	148	165
Goberi [1]	1130	311	303	273	359
Gaya [1]	1730	159	168	147	187
Fada-Kouaré [2]	3460	203	138	131	171
Koukombo [3]	2340	207	126	158	221
Kaboli [3]	2050	154	128	150	219

[1] Perlhirse, [2] Sorghum [3] Mais
n.v. = nicht vorhanden

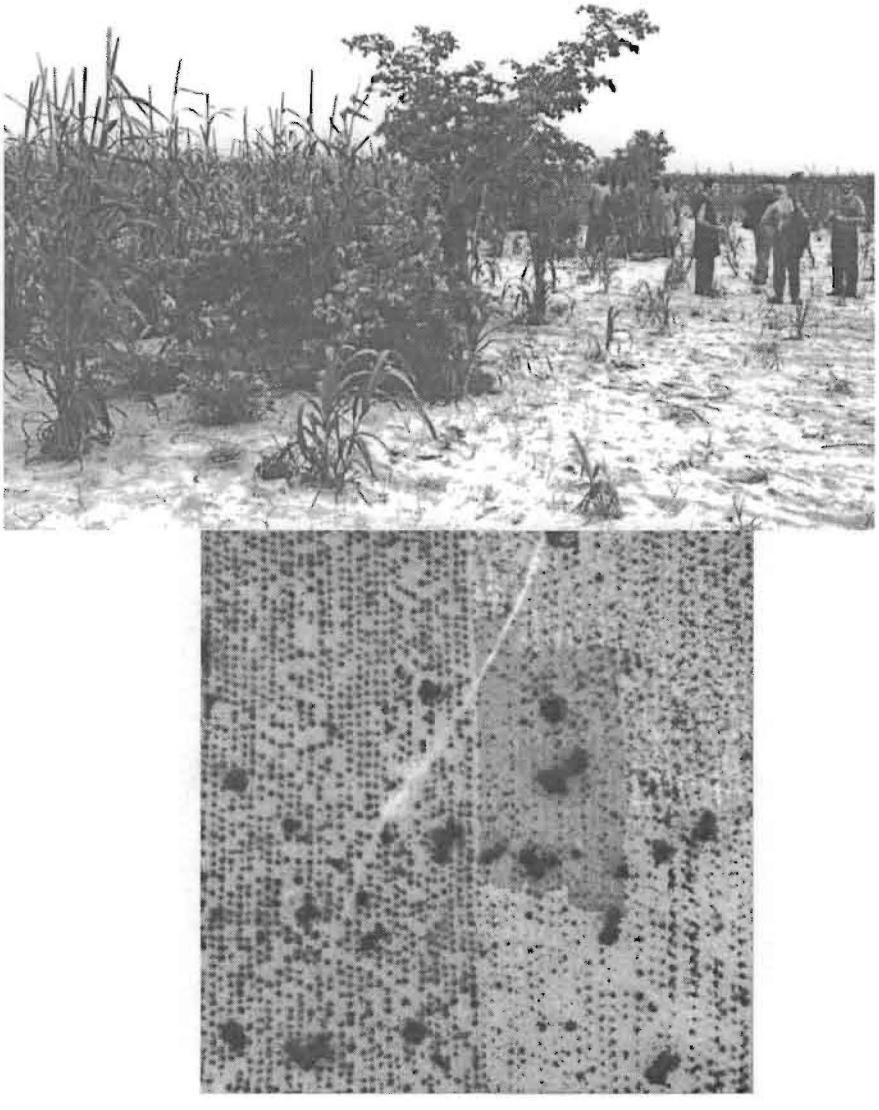

Abbildung 2. Hirsebestand bei Maradi (August 1998). Plazierte NPK-Düngung (oben links) und ungedüngte Kontrolle (oben rechts) und Luftaufnahme aus 200 m Höhe mit den gleichen Behandlungen (plazierte NPK-Düngung unten links; ungedüngt unten rechts).

5 Genotypische Unterschiede in der human- und tierernährerischen Qualität von Perlhirsekorn und -stroh

Der relativ große Umfang der untersuchten Genotypen ermöglichte eine gruppenspezifische Differenzierung, die wichtige grundsätzliche Schlußfolgerungen zu den genotypischen Unterschieden zuläßt. Bei der Interpretation der festgestellten Unterschiede muß allerdings berücksichtigt werden, daß trotz gleichem Mineral-düngungsniveau unter den standardisierten Anbaubedingungen auf Station nur für wenige der Genotypen vergleichbare Ertragsdaten für Korn und Stroh vorlagen. Trotz im Einzelfall sicher vergleichbarer Ertragsniveaus zwischen guten Landsorten und Normalsorten bzw. Hybriden, sind im Einzelfall typische Konzentrationseffekte (bei vergleichsweise sehr geringem Ertrag) oder Verdünnungseffekte (bei sehr hohem Ertrag) nicht auszuschließen.

Für eine gezielte sortenspezifische Bewertung müßten deshalb nochmals Anbauversuche auf größeren Parzellen durchgeführt werden, um für jeden Genotyp die Energie-, Protein- und mineralischen Nährstoffmengen pro Flächeneinheit bestimmen zu können.

5.1 Makro- und Mikronährstoffe im Korn

Auffallend war, trotz großer Schwankungen zwischen den Genotypen vor allem bei den Normalsorten, der auch absolut überraschend hohe Proteingehalt der Landsorten. Demgegenüber wiesen die Normalsorten um 19% und die Testhybriden zwischen 18 und 28% niedrigere Proteingehalte auf. Ähnlich groß waren die Unterschiede im Gesamtgehalt an Phosphat und in geringerem Umfang auch im Gehalt an Kalium. Bei den humanphysiologisch bedeutsamen Spurenelementen zeigten die Landsorten bei allerdings großen Schwankungen zwischen den Sorten ebenfalls weitaus höhere Zinkgehalte als die Normalsorten und Hybriden. Änliches gilt für die Kupfergehalte, die bei den Landsorten ebenfalls deutlich höher sind als bei den Normalsorten und den Hybriden. Wegen der bei derartigen Untersuchungen von Perlhirse aus dem Sahel bereits früher festgestellten überaus hohen Schwankungen im Eisengehalt (Buerkert *et al.*, 1998), können bei diesem Spurennährstoff keine zuverlässigen Aussagen über gruppenspezifische Unterschiede gemacht werden. Das für die Resorption von Zink im menschlichen Körper besonders wichtige Phytat/Zinkverhältnis (PZMR) war trotz der höheren Gehalte an Gesamtphosphat bei den Landsorten deutlich niedriger und damit günstiger als bei den Normalsorten und den B-Hybriden. Insgesamt weisen damit die Vollkornmehle der traditionellen Landsorten wesentlich günstigere ernährungsphysiologische Eigenschaften auf als die züchterisch bearbeiteten Sorten. Eine wesentliche Ursache für die höheren Protein-, Phosphat- und Mikronährstoffgehalte der Landsorten könnte in einem besseren Nährstoffaneignungsvermögen dieser Sorten liegen, die sich auf eine besonders hohe Durchwurzelungsdichte im Oberboden (bis zu 6 cm cm^{-3}, Bürkert unveröffentlicht; Hafner *et al.*, 1993) gründet.

Tabelle 4. Unterschiede in den Gehalten an Makro- und Mikronährstoffen zwischen Gruppen verschiedener Hirsegenotypen.

Gruppe	Protein (%)	Gesamt-P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	PZMR[1]
		(mg kg^{-1})				(μg kg^{-1})		
Landsorten	15.1	2.7	4.4	0.21	1.04	31	6	29
Normalsorten	12.2	2.5	4.6	0.22	0.90	25	5	35
Hybriden A[2]	10.9	2.1	4.0	0.21	0.87	26	4	29
Hybriden B[3]	12.4	2.5	4.5	0.20	0.92	25	4	35
F-Test	*0.001*	*0.003*	*0.08*	*0.52*	*0.001*	*0.001*	*0.001*	*0.001*
SFD[4]	*0.72*	*0.17*	*0.26*	*0.02*	*0.04*	*2.2*	*0.5*	*2.3*

(1) Molares Phytat-P/Zinkverhältnis
(2) Hybriden aus: Inzuchtlinie x Hybridsorte
(3) Hybriden aus:männlich steriler Linie x Hybridsorte
(4) Standardfehler der Differenz

Die festgestellten hochsignifikanten genotypischen Unterschiede in den Konzentrationen an Mikronährstoffen im Hirsekorn könnten allerdings nach der häufig durchgeführten Schälung und der schrittweisen Reinigung des Mehls deutlich geringer werden. Zu berücksichtigen ist dabei, daß die Gehalte der untersuchten Inhaltsstoffe in den äußeren Schichten des Getreidekorns und im Keimling selbst wesentlich höher sein dürften als im Mehlkörper. Da hierzu keine Untersuchungen bekannt sind, sollte bei der Einbeziehung der Untersuchungsergebnisse in Züchtungsprogramme zunächst noch in dieser Richtung gearbeitet werden.

5.2 ß-Carotingehalt, Gesamtenergie und Dynamik der Energiefreisetzung im Korn

Den höchsten ß-Carotingehalt hatten die Normalsorten (Tabelle 5). Dieser lag signifikant über den Werten für die beiden Hybridgruppen und die Landsorten, wobei bei den Landsorten die geringsten ß-Carotingehalte festgestellt wurden. Hier wurde also durch züchterische Maßnahmen eine Erhöhung einer lebenswichtigen Vorstufe für die Vitamin A-Synthese, nämlich des Carotins, erreicht.

Tabelle 5. Asche- und ß-Carotingehalt, *in vitro* Verdaulichkeit der organischen Substanz (IVVOS), umsetzbare Gesamtenergie (ME) und Energiefreisetzungsrate (c) im Perlhirsekorn verschiedener Züchtungsgruppen.

Gruppe	n[(1)]	Asche (%)	ß-Carotin[(2)] (μmol kg^{-1})	IVVOS (%)	ME (MJ kg^{-1} TS)	Rate c
Landsorten	22	1.79^{a}	0.08894^{a}	78.11^{b}	11.95^{b}	0.1013^{b}
Normalsorten	22	1.87^{a}	0.13644^{c}	75.53^{a}	11.46^{a}	0.0811^{a}
Hybriden A	6	1.78^{a}	0.11368^{b}	79.80^{c}	12.21^{b}	0.1080^{c}
Hybriden B	4	1.98^{a}	0.10057^{ab}	79.87^{c}	12.23^{b}	0.1048^{bc}

(1) Stichprobenumfang n
(2) n = 6 für die Carotinbestimung bei den Land- und Normalsorten
Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich bei $P \leq 0.001$
Alle Werte sind bezogen auf die Trockensubstanz (TS)

Zur Berechnung der umsetzbaren Energie, der *in vitro* Verdaulichkeit der organischen Substanz und der Rate der Energiefreisetzung wurde der 'Hohenheimer Futterwerttest' (HFT) angewandt. Das Prinzip des HFT beruht darauf, daß bei der Fermentation eines Futter- oder Nahrungsmittels, Gas entsteht. Die gebildete Gasmenge, hauptsächlich Kohlendioxid und Methan, wird während der Fermentationsphase zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgelesen und dann zur Kalkulation der *in vitro* Verdaulichkeit der organischen Substanz (IVVOS), der umsetzbaren Gesamtenergie (ME) und der Energiefreisetzungsrate (c) herangezogen. Dabei war die Gasbildungsrate als Messgröße zur Beurteilung der Freisetzungsdynamik der potentiell verfügbaren Energie aus dem Hirsekorn der für unsere Untersuchungen wichtigste Parameter.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, daß die Hybriden sowohl die höchste *in vitro* Verdaulichkeit als auch die höchste umsetzbare Gesamtenergie aufwiesen, allerdings dicht gefolgt von den Landsorten (Tabelle 5). Die signifikant niedrigste *in vitro* Verdaulichkeit konnte bei den Normalsorten festgestellt werden. Diese lag um ca. 6% unter der *in vitro* Verdaulichkeit der Hybriden und um ca. 3.5% unter der der Landsorten.

Dieses Ergebnis spiegelte sich auch in der Rate der Energiefreisetzung wieder, die mit 8.1% h^{-1} für die Normalsorten niedriger war als für die Landsorten und die Hybriden, die im Mittel eine Energiefreisetzung von 10.5% h^{-1} aufwiesen. Diese Unterschiede zeigten sich besonders deutlich bis zum Zeitpunkt von 24 h. Bis dahin hatten die Normalsorten eine stets signifikant ($P \leq 0.001$) niedrigere Energiefreisetzungsrate als die Landsorten und vor allem die Hybriden. Zum Zeitpunkt 8 h unterschieden sich die Hybriden A und B in der Energiefreisetzung nicht mehr voneinander, wohingegen erst bei 30 h Inkubationszeit keine Unterschiede mehr zwischen den Landsorten und den Normalsorten festgestellt werden konnten.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse aus der Sicht der Humanernährung und unter der Annahme hoher physischer Anstrengungen der bäuerlichen Zielgruppe ist zu berücksichtigen, daß für eine 'Dauerarbeitsbelastung' eher eine langsame Energiefreisetzung wünschenswert ist, da die Energie dann auch tatsächlich für Arbeitsleistung eingesetzt werden kann. Bei einer zu raschen Energiefreisetzung entsteht ein Energieüberschuß, der dann in Form von Wärme abgegeben wird und somit dem Körper verloren geht. Vor diesem Hintergrund wären die Normalsorten den Landsorten, aber vor allem den Hybriden vorzuziehen. Obwohl die Normalsorten einen niedrigeren Gesamtenergiegehalt im Korn zeigen, ist bei ihnen unter den untersuchten vier Gruppen von Hirsesorten insgesamt die effizienteste Energieausnutzung zu erwarten und somit letztendlich die effizienteste Versorgung des menschlichen Körpers. Die Landsorten nehmen eine mittlere Stellung in Bezug auf die Energieverwertungseffizienz ein und die beiden Hybridgruppen schneiden mit Blick auf die effektiv im Organismus für physische Aktivität verfügbare Energie am schlechtesten ab.

5.3 Gesamtenergie und Dynamik der Energiefreisetzung im Stroh- und Blattmaterial

Aufgrund der Ergebnisse der Kornuntersuchungen (vor allem hinsichtlich der Gasbildungsrate) wurden aus der Gruppe der Lokal- und Normalsorten jeweils sechs Genotypen und aus den beiden Hybridgruppen alle Genotypen für die Strohuntersuchungen ausgewählt. Bei allen wurde das Ganzstroh, die Blätter und jeweils das obere, mittlere und untere Drittel des entblätterten Stengels auf ihre Rohprotein- und Aschegehalte und auf ihre *in vitro* Verdaulichkeit untersucht. Ziel dieser Analysen war es, (i) einen möglichen Zusammenhang zwischen der Gasbildungsrate des Korns und der des Strohs zu prüfen und (ii) die Qualität des Strohs der ausgewählten Genotypen aus tierernährerischer Sicht zu beurteilen.

Tabelle 6. Rohprotein-(CP) und Aschegehalt, *in vitro* Verdaulichkeit der organischen Substanz (IVVOS), umsetzbare Gesamtenergie (ME) und Abbaurate der organischen Substanz (c) im Hirsesproß (Stroh und Blattmaterial) verschiedener Züchtungsgruppen.

Material	Gruppe	n[1]	CP (%)	Asche (%)	IVVOS (%)	ME (MJ kg^{-1} TS)	Rate c
Ganzstroh	Landsorten	7	4.68^{c}	6.78^{a}	39.54^{b}	5.26^{a}	0.03820^{bc}
	Normalsorten	7	3.66^{ab}	7.02^{a}	38.51^{ab}	5.07^{a}	0.04068^{c}
	Hybriden A	6	2.81^{a}	6.38^{a}	37.72^{a}	5.03^{a}	0.03298^{a}
	Hybriden B	4	4.10^{bc}	7.68^{a}	40.28^{b}	5.27^{a}	0.03545^{ab}
	Mittel		*3.81*	*6.96*	*39.01*	*5.17*	*0.03682*
Blätter	Landsorten	7	6.45^{a}	10.60^{b}	48.74^{a}	6.25^{a}	0.03707^{b}
	Normalsorten	7	7.36^{b}	9.13^{ab}	48.59^{a}	6.36^{a}	0.03683^{ab}
	Hybriden A	6	5.98^{a}	8.22^{a}	47.20^{a}	6.26^{a}	0.03470^{ab}
	Hybriden B	4	6.25^{a}	8.44^{ab}	46.61^{a}	6.11^{a}	0.03281^{a}
	Mittel		*6.51*	*9.09*	*47.78*	*6.24*	*0.03535*
Oberer Stengel	Landsorten	7	4.82^{b}	6.24^{a}	34.65^{a}	4.55ab	0.02650^{a}
	Normalsorten	7	4.84^{b}	7.50^{b}	35.42^{ab}	4.54^{ab}	0.02378^{a}
	Hybriden A	6	3.44^{a}	8.13^{b}	34.43^{a}	4.34^{a}	0.02301^{a}
	Hybriden B	4	3.61^{a}	7.97^{b}	37.16^{b}	4.77^{b}	0.02493^{a}
	Mittel		*4.17*	*7.46*	*35.14*	*4.55*	*0.02455*
Mittlerer Stengel	Landsorten	7	3.76^{b}	4.33^{a}	33.90^{a}	4.63^{a}	0.02835^{a}
	Normalsorten	7	3.88^{b}	5.42^{a}	34.82^{a}	4.67^{a}	0.02945^{a}
	Hybriden A	6	2.70^{a}	8.53^{b}	35.54^{a}	4.48^{a}	0.02918^{a}
	Hybriden B	4	2.89^{a}	6.38^{ab}	35.20^{a}	4.64^{a}	0.03011^{a}
	Mittel		*3.30*	*6.16*	*34.86*	*4.60*	*0.02972*
Unterer Stengel	Landsorten	7	3.87^{b}	5.85^{a}	33.13^{a}	4.37^{a}	0.03114^{a}
	Normalsorten	7	3.65^{b}	4.82^{a}	33.25^{a}	4.49^{a}	0.03306^{a}
	Hybriden A	6	2.41^{a}	4.40^{a}	31.59^{a}	4.29^{a}	0.03239^{a}
	Hybriden B	4	2.58^{a}	4.58^{a}	33.65^{a}	4.58^{a}	0.03181^{a}
	Mittel		*3.12*	*4.91*	*32.90*	*4.43*	*0.02850*

[1] Stichprobenumfang n
Mittelwerte mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich bei $P \leq 0.001$
Alle Werte sind bezogen auf die Trockensubstanz (TS)

Über alle Genotypen hinweg, lassen sich die Rohprotein- und Aschegehalte wie folgt gruppieren: Blätter > oberer Stengel > Ganzstroh > mittlerer Stengel > unterer Stengel (Tabelle 6). Die höheren Proteinwerte der oberen Stengelabschnitte lassen sich dadurch erklären, daß diese vegetationsmäßig jüngsten Fraktionen am längsten photosynthetisch aktiv und am spätesten der Stickstofftranslokation in die Körner unterworfen waren. Ähnlich wie beim Korn, so waren auch beim Rohproteingehalt die Werte im Ganzstroh der Lokalsorten am höchsten und bei den A-Hybriden 40% niedriger, was wiederum das besonders hohe Nährstoffaneignungsvermögen der Lokalsorten unterstreicht (Tabelle 6). Die höchsten Rohproteingehalte der Blätter wurden jedoch bei den Normalsorten

gefunden, was möglicherweise Ausdruck einer züchterisch gewollten Translokation von Nährstoffen hin zum Korn ist. Die Ursachen für die höheren Aschegehalte der Blätter und der oberen Stengelabschnitte sind unklar. Da durch die Bestimmung der HCl-unlöslichen Asche jedoch eine Unterscheidung zwischen biogenen Ascheanteilen und Stäuben möglich wird, könnten die höheren Ascheanteile in den oberen Stengelabschnitten Ausdruck ihrer im Vergleich zur Sproßbasis höheren Belastung durch windtransportierte Partikel sein.

Ähnlich wie bei den Rohproteingehalten, so wurde auch bei der *in vitro* Verdaulichkeit und der umsetzbaren Gesamtenergie die höchsten Werte in den Blättern festgestellt, gefolgt von denen im Ganzstroh (Tabelle 6). Die Verdaulichkeit der einzelnen Stengelabschnitte nahm erwartungsgemäß tendeziell vom jüngsten zum ältesten Abschnitt hin ab, was den sequentiellen Abfraß des Sproßes durch Wiederkäuer bei der vorherrschend betriebenen Stoppelbeweidung erklärt. Für den Gesamtenergiegehalt ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen der Genotypen nur für das Ganzstroh und die oberen Stengelabschnitte. Dabei zeigte das Material der Hybridgruppe A die niedrigste und das der Hybridgruppe B die höchste *in vitro* Verdaulichkeit (Tabelle 6).

Bei der Abbaurate des Ganzstrohs wurden nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Probenarten gefunden. Die etwas niedrigeren Werte in den Blättern im Vergleich zum Ganzstroh könnte auf eine stärkere Lichtexposition dieser Sproßteile zurückzuführen sein, die über eine Anregung bestimmter Enzyme zur vermehrten Bildung antinutritiv wirkender Substanzen wie Lignin- und Tanninphenolen geführt haben könnte (Guerra *et al.*, 1985; Jung and Russelle, 1991). Dies würde auch die überraschenderweise niedrigere Abbaurate der oberen Stengelabschnitte erklären, die signifikant ($P \leq 0.05$) geringer war als die Rate der mittleren und unteren Stengelabschnitte (Tabelle 6). Nur bei den Landsorten konnten keine Unterschiede zwischen den Abauraten der einzelnen Stengelabschnitte festgestellt werden.

Aus tierernährerischer Sicht ist, im Gegensatz zur humanernäherischen Situation beim Hirsekorn, eine möglichst hohe Abbaurate (Energiefreisetzungsrate) des Sproßmaterials vorteilhaft, da eine schnelle Fermentationsrate die Passagerate im Pansen erhöht und damit die Futter- und Nährstoffaufnahme der Tiere steigert. Vor diesem Hintergrund ist also die Futterqualität des Ganzstroh- und Blattmaterials der Landsorten ähnlich dem der Normalsorten, aber deutlich besser als die der beiden Hybridgruppen. Dazu kommt, daß vor allem die Land-, aber auch die Normalsorten eine sehr viel höhere Strohmenge produzieren als die Hybriden, d.h. also eine wesentlich größere Menge an tierisch verwertbarer Energie.

Abschließend lassen sich aus human- und tierernährerischer Sicht folgende Schlußfolgerungen zur Qualität des Korn- und Strohmaterials aus den verschiedenen Gruppen der untersuchten Genotypen ziehen:

- Es gibt offensichtlich eine beträchtliche genetisch bedingte Variabilität in den analysierten Qualitätsparametern bei Perlhirse, die bei der Erstellung künftiger Züchtungsprogramme berücksichtigt werden sollte. Erleichternd kommt hinzu, daß keine negativen Korrelationen zwischen den einzelnen Qualitätsmerkmalen festzu-

stellen waren. Generell wichtig ist, daß in den agro-pastoralen Produktionssystemen des Sahel nicht nur der Kornertrag und seine Qualität eine Rolle spielen sondern gerade auch die Masse und Verdaulichkeit der nach der Ernte verbleibenden tierisch nutzbaren vegetativen Sproßteile.

- Die traditionellen Landsorten und in einigen der untersuchten Parametern auch die Normalsorten, zeigen im Vergleich zu den Hybriden eine deutlich bessere human- und tierphysiologische Qualität. Obwohl die Gründe für das relativ schlechte Abschneiden vor allem der Hybriden unklar sind und vermutlich in der Wahl der Elterngenerationen liegen, ist dieses Ergebnis von großer Bedeutung für die Wahl geeigneter Züchtungsprogramme. Es mag auch einer der Gründe sein für das bisher oft beobachtete bäuerliche Zögern bei der Übernahme neuer Hirsegenotypen in die vorherrschenden Hirse-Mehrnutzungssysteme.

6 Danksagung

Die diesen Ergebnissen zugrundeliegenden Untersuchungen wurden in den Jahren 1996 und 1997 großzügig gefördert durch die Eiselen-Stiftung Ulm und die Infrastruktur durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 308 'Standortgemäße Landwirtschaft in Westafrika. Besonderer Dank gilt Frau Marion Moser, Frau Barbara Renz und Prof. Biesalski für die mit großem Engagement durchgeführten Analysen und ihre Auswertung sowie Dr. K. A. Kumar und Dr. S. Ouattara (ICRISAT Sahelian Center, Niamey) für die Überlassung der Hirsegenotypen.

7 Literaturverzeichnis

Bationo, A., Chien, S. H., Henao, J., Christianson, C. B. und Mokwunye, A. U. 1990. Agronomic evaluation of two unacidulated and patially acidulated phosphate rocks indigenous to Niger. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 1772-1777.

Bationo, A., Christianson, B. C., Baethgen, W. E. and Mokwunye, A. U. 1992. A farm-level evaluation of nitrogen and phosphorus fertiliser use and planting density for pearl millet production in Niger. Fert. Res. 31, 175-184.

Bationo, A. and Mokwunye, A. U. 1991. The role of manure and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. Fert. Res. 29, 117-125.

Buerkert, A. 1995. Effects of crop residues, phosphorus and spatial soil variability on yield and nutrient uptake of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) in Southwest Niger. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart, 272 pp.

Buerkert, A. und Hiernaux, P. 1998. Nutrients in the West African Sudano-Sahelian zone: losses, transfers and role of external inputs. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 161 (in press).

Buerkert, A., Haake, C., Ruckwied, M. and Marschner, H. 1998. Phosphorus application affects the nutritional quality of millet grain in the Sahel. Field Crops Research 57, 223-235.

Guerra, D., Anderson, J. und Salisbury, F. B. 1985. Reduced phenylalanine ammonia-lyase and tyrosine ammonia-lyase activities and lignin synthesis in wheat grown under low pressure sodium lamps. Plant Physiology 78, 126-130.

Hafner, H., Bley, J., Bationo, A. und Marschner, H. 1993. Long-term nitrogen balance for pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) in an acid sandy soil of Niger. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 156, 169-176.

Jung, H. G. und Russelle, M. P. 1991. Light source and nutrient regime effects on fibre composition and digestibility of forages. Crop Science 31, 1065-1070.

McClellan, G. H. and Notholt, A. J. G. 1986. Phosphate deposits of tropical sub-Saharan Africa, p. 173-223. *In* A. U. Mokwunye and P. L. G. Vlek (eds.) Management of nitrogen and phosphorus fertilisers of sub-Saharan Africa. Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.

Muehlig-Versen, B., Buerkert, A., Bationo, A. und Marschner, H. 1997. Crop residue and phosphorus management in millet based cropping systems on sandy soils of the Sahel. p. 31-40. *In* G. Renard, A. Neef, K. Becker und M. von Oppen (eds.) Soil fertility management in West African land use systems. Proceedings of a Regional Workshop, University of Hohenheim, ICRISAT and INRAN, Niamey, Niger, 4-8 March 1997. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany.

Rebafka, F.-P., Bationo, A. and Marschner, H. 1993. Phosphorus seed coating increases P uptake, early growth and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) grown on an acid sandy soil in Niger, West Africa. Fert. Res. 35, 151-160.

Werner, W. und Warnusz, J. 1997. Ecological evaluation of long-term application of sewage sludges according to the legislative permissions. p.577-579. *In* T. Ando *et al.* (eds.). Plant nutrition - for sustainable food production and environment. Development in Plant and Soil Sciences, vol. 78. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.