

**KONVENTIONELLE LANDNUTZUNG UND TRADITIONELLE HOCHBEETE
(SUKA KOLLUS) AM TITICACASEE, BOLIVIEN
— AGRARÖKOLOGISCHE STANDORTBEDINGUNGEN IM VERGLEICH —**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Anja Stache, Dipl.- Ing. agr.
aus Berlin

Göttingen 2000

D7

Referent: Prof. Dr. G. Gerold

Korreferent: Prof. Dr. P. Vlek

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

Danksagung

Abkürzungsverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Lage des Untersuchungsgebietes

Lageskizze der Hochbeete

1.	Einleitung	
1.1	Hochbeete in Bolivien	S. 1
1.2	Forschungsstand	S. 2
1.3	Fragestellung und Zielsetzung	S. 5
2.	Einführung in das Untersuchungsgebiet	
2.1	Klima und Vegetation	S. 7
2.2	Hydrologie	S. 8
2.3	Geologie und Böden	S. 8
2.4	Landnutzung	S. 9
3.	Material und Methoden	
3.1	Luft- und Bodentemperaturen	S. 13
3.1.1	Lufttemperaturen	S. 13
3.1.2	Tagesverlauf der Bodentemperaturen	S. 13
3.1.3	Temperaturverlauf während der Vegetationszeit	S. 13
3.2	Bodenwasserspannungen	S. 13
3.3	Bodennährstoffgehalte	S. 14
3.3.1	Versuchsanlage und Untersuchungszeitraum für die Bodenbeprobung beider Landnutzungssysteme (Basis- und Querschnittsbeprobung (Mikroprofil))	S. 14
3.3.2	Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert	S. 15
3.3.3	Organische Substanz	S. 15
3.3.4	Gesamtstickstoffgehalt	S. 16
3.3.5	Phosphorextraktion nach Olsen	S. 16
3.3.6	Austauschbare Kationen	S. 17
3.3.7	Pflanzenverfügbares Natrium, Kalium und Calcium nach Egner-Riehm	S. 17
3.3.8	Bodenprofile	S. 18
3.3.9	Bewässerungswasser der Kanäle	S. 18
3.4	Statistische Auswertung	S. 18
3.4.2	t-Test	S. 18
3.4.3	Diskriminanzanalyse	S. 19
3.5	Erträge	S. 20
3.5.1	Produktivität durch Einzelpflanzenenerträge	S. 20
4.	Ergebnisse	
4.1	Luft- und Bodentemperaturen in beiden Systemen	S. 21

4.1.1	Lufttemperaturen	S. 21
4.1.2	Bodentemperaturen im Tagesverlauf	S. 22
4.1.3	Bodentemperaturverlauf während der Vegetationszeit	S. 25
4.1.4	Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse	S. 27
4.2	Bodenfeuchte während der Vegetationszeit in beiden Systemen	S. 28
4.2.1	Verlauf der Bodenfeuchte	S. 28
4.2.2	Wasserbewegung im Boden	S. 35
4.2.3	Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse	S. 37
4.3	Bodennährstoffgehalte in Ober- und Unterböden der Systeme	S. 39
4.3.1	Signifikante Unterschiede zwischen den Systemen (t-Test)	S. 39
4.3.1.1	Pflanzenverfügbare Nährstoffe	S. 41
4.3.2	Wichtige Parameter zur Unterscheidung der Systeme (Diskriminanzanalyse)	S. 43
4.3.3	Räumliche Variabilität der Systeme	S. 44
4.3.4	Zeitliche Variabilität der Systeme	S. 45
4.3.5	Nährstoffvorräte in Hochbeeten und konventionellen Feldern	S. 49
4.3.5.1	Qualität des Bewässerungswassers	S. 49
4.3.6	Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse des Kapitels Bodennährstoffgehalte	S. 50
4.4	Erträge auf Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung	S. 52
4.4.1	Produktivität durch Einzelpflanzenenerträge	S. 52
5.	Diskussion	S. 53
5.1	Lufttemperaturen	S. 53
5.2	Bodentemperaturen	S. 54
5.3	Bodenfeuchte	S. 56
5.4	Bodennährstoffgehalte	S. 58
5.4.1	Bewertung nach Grenzwerten und zeitliche Entwick- lung der bodenchemischen Parameter in den Systemen	S. 58
5.4.2	Räumliche Variabilität der Systeme	S. 69
5.4.3	Bewertung der Nährstoffvorräte	S. 69
5.5	Erträge	S. 72
6.	Zusammenfassung	S. 76
	Summary	S. 78
	Resúmen	S. 81
7.	Literaturverzeichnis	S. 84

Danksagung

Herrn Prof. G. Gerold danke ich für sein Interesse an diesem Thema und damit für das Zustandekommen der Arbeit überhaupt. Über den motivierenden Geländebesuch während der Feldarbeiten in Bolivien habe ich mich sehr gefreut. Darüber hinaus bedanke ich mich für seine ständige Bereitschaft zu Gesprächen, für wertvolle Tips und die finanzielle Unterstützung am Geographischen Institut der Georg – August - Universität Göttingen.

Prof. Vlek danke ich für die Einführung am Institut für tropischen und subtropischen Pflanzenbau und Prof. Veldkamp für seine Hilfsbereitschaft bei der Durchsicht einzelner Kapitel. Beiden danke ich für die ständige Gesprächsbereitschaft.

Dr. Ronald Kühne half mir während der gesamten Zeit durch motivierende und LANGE Gespräche fast noch mehr als durch die Unterstützung bei der Durchführung der statistischen Analysen. Ihm danke ich sehr.

Herr W. Eisenberg danke ich für die Hilfe bei der Bildgrafik und Frau Friedrich für Ihre Kommunikation und Hilfsbereitschaft.

In Bolivien / La Paz, am Institut für Ökologie (Universidad Mayor de San Andrés UMSA), wo der Großteil der Analysen durchgeführt wurde, bedanke ich mich bei der Unidad de suelos: Christina Ruíz, Isabel Morales und Patricia Amurrio und beim Laboratorio de Calidad Ambiental LCA: Margot Franken, Franz Velasco, vor allem aber Jaime Chincheros und Juan-Carlos Salcedo. Robert Karsten und Michael Markussen danke ich für die tatkräftige Hilfe im Gelände.

Träger des Programms PROSUKO "Programa Interinstitucional de Suka Kollus (Hochbeete)", sind das bolivianische Umweltministerium Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente und COSUDE Cooperación Suiza al Desarrollo. Durchführende und verwaltende Institutionen sind die Intercooperación (Organización Suiza para el Desarrollo y la Cooperación), Repräsentant für die Technische Zusammenarbeit Boliviens mit der Schweiz, und die Unidad Operativa Boliviana de la Autoridad Binacional Autónoma de la Cuenca del Sistema Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar, innerhalb des Umweltministeriums.

Das Projekt PROSUKO stellte die Untersuchungsflächen zur Verfügung, unterstützte die Geländearbeit logistisch und einige Analysen finanziell. Darüber hinaus wurden mir vom Projekt erhobene Temperatur- und Tensiometerdaten zur Verfügung gestellt. Hier bedanke ich mich beim Co-Director, Gualberto Terrazas, für sein unbürokratisches Vorgehen und die ständige Kommunikation. Alberto, Reynaldo, Edwin und Cornelio halfen mir bei den Feldbesuchen.

In Göttingen am Geographischen Institut danke ich Anette und Annette, Ulf, Jürgen, „Jeppel“, Jürgen B., Norbert Lanfer, Elke, Marcus, Frau Kunzke und Dorothea Röckl für die freundliche Aufnahme in die Abteilung Landschaftsökologie, die vielen kleinen „sachdienlichen“ Hinweise und Hilfestellungen während der Anfertigung der Arbeit und vor allem für nette Aufmunterungen in der Endphase des Schreibens.

Und sonst: Mil Gracias an meine Eltern in „Bovilien“, an WW Black Beauty und besonders an *die* Petra für die Hilfe in den letzten Wochen.

Abkürzungsverzeichnis:

Institutionen:

PROSUKO	Proyecto Interinstitucional de Suka Kollus, (finanziert von: COSUDE Cooperación Suiza al Desarrollo)
PIWA	Proyecto Interinstitucional WaruWaru

Begriffe:

Ca^{2+}	Calcium
CaCO_3	Calciumcarbonat
$(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)$	Calciumhydrogencarbonat
EL	Elektrische Leitfähigkeit
EC	Electrical Conductivity
ESP - Wert	Exchangeable Sodium Percentage
ETR	reale Evapotranspiration
ETP	potentielle Evapotranspiration
K^+	Kalium
KAK	Kationenaustauschkapazität
$\text{KAK}_{\text{eff.}}$	Effektive Kationenaustauschkapazität
Mg^{2+}	Magnesium
$\text{N}_{\text{ges.}}$	Gesamtstickstoffgehalt
Na^+	Natrium
nFK	nutzbare Feldkapazität
$\text{NH}_4^+ \text{ac.}$	Ammoniumacetat
org. Substanz	organische Substanz
P Ols.	Phosphor bestimmt nach der Methode Olsen
SAR – Wert	Sodium Adsorption Ratio
WS	Wassersäule
WaruWaru	Hochbeete
Suka Kollu	Hochbeete
Raised Field	Hochbeete

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen:

Tabellen:

Tab. 1: Beschreibung eines Bodenprofils a) auf Hochbeeten und b) auf konventionellen Feldern

Tab. 2: Schwankung (Variationskoeffizienten) des mittleren Bodenwassergehaltes in Hochbeeten (östlicher Rand, Mitte, westlicher Rand) und im konventionellen Anbausystem (2 Standorte) in zwei Perioden der Vegetationszeit 1997 / 98 (16.12. bis 30.01., n = 13 (1) und 02.02. bis 14.04., n = 39 (2)); Variationskoeffizient berechnet aus: (Standardabweichung / Mittelwert)*100

Tab. 3: Signifikante Unterschiede (Mittelwerte, n = 8) der bodenchemischen Parameter zwischen konventioneller Landnutzung und traditionellen Hochbeeten im Ober- und Unterboden: zu Beginn und am Ende von Vegetationszeit 1 (Zeitpunkt Z 1 und Z 2) und zu Beginn von Vegetationszeit 2 (Zeitpunkt Z 3); (t-Test), signifikante Werte (< 0,05) durch Fettdruck hervorgehoben

Tab. 4: $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ Verhältnisse (berechnet aus Mittelwerten, n = 8) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und konventioneller Landnutzung zu drei Zeitpunkten

Tab. 5: Pflanzenverfügbare Nährstoffe (Mittelwerte, n = 8) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung zu Beginn der zweiten Vegetationszeit; Variationskoeffizient berechnet aus: (Standardabweichung / Mittelwert)*100

Tab. 6: Pflanzenverfügbare Nährstoffvorräte in kg ha^{-1} im Ober- und Unterboden in Hochbeeten und konventionellen Feldern

Tab. 7: Diskriminanzanalyse: Anteil aller Parameter und Anteil und Rangfolge einzelner Parameter zur Unterscheidung von konventioneller Landnutzung und Hochbeeten zu drei Zeitpunkten (Z 1 und Z 2 Beginn und Ende von Vegetationszeit 1, Z 3 Beginn von Vegetationszeit 2)

Tab. 8: Heterogenität der Hochbeete beschrieben durch bodenchemische Parameter (Mittelwerte n = 5 mit je 20 Einstichen, vgl. 3.5.2) im Mikroprofil (Einstich am östlichen Rand des Hochbeets, Einstich 80 cm vom Rand entfernt, Einstich in der Mitte des Hochbeets usw.) zu Beginn der zweiten Vegetationszeit

Tab. 9: Heterogenität konventioneller Felder beschrieben durch bodenchemische Parameter (Mittelwerte n = 5 in einer Linie: Einstich bei 0,0 m; bei 0,8 m usw. mit je 20 Einstichen, vgl. 3.5.2) im Mikroprofil zu Beginn der zweiten Vegetationszeit

Tab. 10: Nährstoffgehalte (Einzelwerte) im Bewässerungswasser der Kanäle der Hochbeete

Tab. 11: Nährstoffvorräte in kg*ha^{-1} (Nährstoffkonzentrationen * Gewicht des Bodens * ha^{-1} * $0,2 \text{ m}^{-1}$, unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte) im Ober- und Unterboden in zwei Landnutzungssystemen zu Beginn von Vegetationszeit 2

Tab. 12: Mittlerer Einzelpflanzenenertrag (kg Pflanze^{-1}) und Ertrag pro Hektar (kg ha^{-1}) bei idealem, theoretischem Pflanzenbestand ($44\,444 \text{ Pflanzen ha}^{-1}$) von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) auf Hochbeeten und konventionellen Feldern

Tab. 13: Zusammenstellung von Luftminimumtemperaturunterschiede zwischen Hochbeeten und konventionellen Feldern in 10 cm Höhe nach verschiedenen Autoren

Tab. 14: Indirekte Bewertung des Gehaltes an org. Substanz (Walkley & Black) durch C_{org} und Bewertung von Gesamtstickstoff (Kjeldahl) nach LANDON (1992, S.138)

Tab. 15: Bewertung der Phosphorkonzentrationen (Olsen) durch Grenzwerte nach verschiedenen Autoren

Tab. 16: Phosphoransprüche verschiedener Nutzpflanzen (LANDON 1992)

Tab. 17: Bewertung pflanzenverfügbarer Nährstoffvorräte in $kg\ ha^{-1}$ (SCHLICHTING et al. 1995, S.250)

Tab. 18: Zusammenstellung von lokalen Nährstoffuntersuchungen in Hochbeeten und in konventionellen Feldern

Tab. 19: Zusammenstellung der Nährstoffentzüge ($kg\ ha^{-1}$) nach verschiedenen Autoren bei dem Anbau von Kartoffeln

Tab. 20: Zusammenstellung der Erträge von Bitterkartoffeln und normalen Kartoffeln auf Hochbeeten und konventionellen Feldern nach verschiedenen Autoren

Tab. 21: Ertrag ha^{-1} von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) unter Berücksichtigung der Systemfläche (1 ha Anbaufläche konventionell, 0,7 ha Anbaufläche Hochbeete)

Abbildungen:

Abb. 1: Mittlere monatliche Minimumlufttemperaturen (gemittelt aus täglichen Minimumlufttemperaturen) in 10 cm Höhe während der ersten Vegetationszeit 1997 / 98 in Hochbeeten H (Standort Mitte) und im konventionellen System K

Abb. 2: Tägliche Minimumlufttemperaturen in 10 cm Höhe im Dezember 1997 in beiden Systemen (Hochbeet: mittlerer Standort)

Abb. 3: Mittlerer Tagestemperaturverlauf (stündliche Mittelwerte von 6 Tagen) im Boden von Hochbeeten (Standort Mitte) und konventionellen Feldern a) automatische Messungen in zwei Bodentiefen b) eigene Messungen in drei Bodentiefen

Abb. 4: Mittlere monatliche Minimumtemperaturen (M), gemittelt aus Minimumtagestemperaturen, und deren Schwankungsbreite (Min, Max) in beiden Systemen (Hochbeete: H, konventionell: K) in zwei Bodentiefen (10 und 30 cm) während der Vegetationszeit 1997 / 1998

Abb. 5: Mittlere monatliche Minimumtemperaturen (M), gemittelt aus Minimumtagestemperaturen, und deren Schwankungsbreite (Min, Max) in beiden Systemen (Hochbeete: H, konventionell: K) in zwei Bodentiefen (10 und 30 cm) zu Beginn der zweiten Vegetationszeit 1998 / 99

Abb. 6: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 8 (Nordende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

Abb. 7: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 8 (Südende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

Abb. 8: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 4 (Nordende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

Abb. 9: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe auf konventionell bewirtschafteten Feldern an 2 Standorten, während der Vegetationszeit 1997 / 98

Abb. 10: Hydraulischer Gradient (hPa / cm) während der Vegetationszeit in 20 cm Bodentiefe der Hochbeete 8 (Nord-, Südende) und 4 (Nordende) sowie im konventionellen System (von oben nach unten)

Abb. 11: Elektrische Leitfähigkeit (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1 und Z 2 (1997 / 98), und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Abb. 12: Ca^{2+} – Konzentrationen (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, Z 2, (1997 / 98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Abb. 13: Gehalte an org. Substanz (berechnet aus C_{org}) (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, 2, (1997 / 98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit, Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Abb. 14: Phosphorkonzentrationen (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, Z 2, (1997 / 98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit, Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

1. Einleitung

1.1 Hochbeete in Bolivien

Hochbeete (Suka Kollus, Waru Warus, Raised Fields) sind prähispanische intensive Landnutzungsformen, die sowohl in Lateinamerika als auch auf anderen Kontinenten von verschiedenen Kulturen genutzt wurden. In Sumpfgebieten dienten sie der Drainage, in trockenen Regionen wurden sie zu Bewässerungszwecken angelegt. Sie sind bis zu 100 m lang, 4 - 5 m breit (Anbaufläche 4 m*100 m) und werden von 2 m breiten und bis zu 1 m tiefen Wasserkanälen umgeben. Bei der Konstruktion wird erst der Oberboden, dann der Unterboden in Blöcken herausgestochen und aufgeschichtet. Die Größe dieser Hochbeetanlagen kann einen bis mehrere Hektar umfassen. Demgegenüber steht seit der spanischen Kolonisation die weit verbreitete konventionelle Landnutzung. Gemeint ist damit extensiver Regenfeldbau.

In Bolivien wurde durch die zentralistische Organisation der Tiwanaku - Kultur (800 v. Chr. - 1200 n. Chr.) die arbeitsintensive Konstruktion der Hochbeete gewährleistet. Die Stabilität der Landnutzungsmethoden der andinen Hochkulturen wurde jedoch durch die beginnende spanische Kolonialzeit erschüttert und durch den Zerfall der sozialen Strukturen zerstört. Die ehemals intensive Landnutzung auf der Hochebene ging über in eine extensive Subsistenzlandwirtschaft mit neu eingeführten Nutzpflanzen (MONTES DE OCA 1989).

Das Projekt PROSUKO (Programa Interinstitucional de Suka Kollus, Interinstitutionelles Programm für Hochbeete) der Technischen Zusammenarbeit der Schweiz (COSUDE Cooperación Suiza al Desarrollo) hat als Ziel, Hochbeete als Alternative zu konventioneller Landnutzung einzuführen. Neue Hochbeete wurden in der ersten Projektphase an verschiedenen Standorten konstruiert und nach agronomischen Kriterien evaluiert. Zur Zeit wird der Schwerpunkt auf die Ausbildung und die Extension, bzw. die Konstruktion weiterer Hochbeete gelegt.

Der Altiplano ist eines der landwirtschaftlichen Hauptanbauggebiete und wird von mehr als ¼ der ländlichen Bevölkerung Boliviens bewohnt. Er wurde seit prähispanischen Zeiten für den intensiven Anbau von Wurzel- und Knollenfrüchten (*Solanum tuberosum* Arten) und Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii*) sowie Pseudozerealien (*Chenopodium quinoa*) genutzt (VACHER 1998). Die Kartoffel ist eine der wichtigsten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Bolivien (MONTES DE OCA 1989, S.385). In der Kartoffelproduktion lag Bolivien 1992 mit 1 298 000 t an sechster Stelle von 12 lateinamerikanischen Ländern (ANUARIO ESTADÍSTICO DEL SECTOR RURAL 1994, S.322). Große Bedeutung hat auf dem nördlichen Altiplano vor allem die Ernährungssicherung durch die Schaffung von Nahrungsvorräten. Hierzu werden die Bitterkartoffeln dehydriert und sind aufgrund dessen fast unbegrenzt lagerfähig (MONTES DE OCA 1989, S. 385). In dieser Form stellen sie einen wichtigen Faktor für die lokale Vermarktung dar.

Die landwirtschaftliche Nutzung des Altiplanos wird jedoch durch ungünstige Standortbedingungen begrenzt. Neben einer hohen Variabilität der Niederschläge während der Vegetationszeit und der dadurch entstehenden, häufigen Trockenperioden, kommt es zu intensiven Frösten. Die Erträge variieren deshalb um einen niedrigen Durchschnitt (VACHER 1998).

1.2 Forschungsstand

Landwirtschaftliche Produktion auf Hochbeeten an marginalen Standorten ist in Lateinamerika weit verbreitet.

So wurden im südlichen Hochland von Ecuador auf einer Fläche von 18 km² prähispanische Hochbeete entdeckt, deren wichtigste Funktion in der Ertragssicherung bestand. Aufgrund der Kanäle wurde ein schützendes Mikroklima gegen häufig auftretende Fröste während der Vegetationszeit gebildet. Trockenperioden, hervorgerufen durch die Variabilität der Niederschläge während der Vegetationszeit, konnten durch das gespeicherte Wasser in den Kanälen gemildert werden. Durch zwei Ernten pro Jahr war die Produktivität so groß, daß sich arbeitsintensive Maßnahmen, wie das Säubern der Kanäle mit anschließendem Aufbringen der organischen Substanz auf die Hochbeete, lohnten. Die schachbrettartige Anordnung der Hochbeete wurde als Indiz gewertet, daß Wasserkonservierung wichtiger als Drainage war (KNAPP und RYDER 1983).

DENEVAN und MATHEWSON (1983) berichten über 10.000 ha Hochbeete im Guayas Becken östlich von Guayaquil, an der Küste Ecuadors. Sie wurden mit der C¹⁴ Altersdatierung auf die ältesten (2000 - 2500 A.C.) entdeckten Hochbeete geschätzt. Das Guayas Becken wird durch die entwässernden Flüsse aus den Anden periodisch überflutet, so daß die Hochbeete hier primär zur Drainage dienten. Durch diese Hochbeete wurden vermutlich 160.000 bis 190.000 Menschen ernährt.

Mit der Ausdehnung des Reisanbaus in den 50er Jahren wurden in Surinam, wo landwirtschaftliche Nutzung in der Küstenebene beschränkt ist auf flußnahe Flächen, Hochbeete auf sandigem und tonigem Ausgangsmaterial gefunden (VERSTEEG 1983).

Auch in Belize wird im Einzugsgebiet des New River von saisonaler, prähispanischer Landnutzung ausgegangen (Maya). Im Gegensatz zu den bis jetzt erwähnten, wurden Hochbeete hier intensiv während der Trockenzeit genutzt. Angewandte Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit waren dabei die Applikation von Gips zur Verbesserung der Bodenstruktur und Erhöhung des Wasserspeichervermögens. In der Regenzeit wurde extensiver slash & burn Anbau mit Inter- und Multicropping praktiziert (LAMBERT und ARNASON 1983). An der nördlichen Küste Belizes wurden mit Hilfe von SLAR (Side looking airborne radar Techniken) ebenfalls Hochbeete gefunden, die je nach topographischer Lage zur Be- bzw. Entwässerung dienten (SCARBOROUGH 1983). Eine Übersicht über die Arbeitsintensität bei der Konstruktion der Hochbeete in Belize im Vergleich zum Terrassenanbau und zu extensiver Landnutzung gibt TURNER (1983). Dabei wird die arbeitsintensive Konstruktion der Hochbeete mit einer hohen Nachfrage an landwirt-

schaftlicher Produktion durch Bevölkerungswachstum in Verbindung gebracht. Der ehemals intensive Anbau der prähispanischen Kulturen (Maya) wurde durch die Ankunft der Spanier zerstört und durch extensive Landnutzungsformen, beispielsweise slash & burn, ersetzt und bis heute praktiziert. Physiogeographisch wurde unterschieden zwischen Hochland Systemen: Slash & Burn und Terrassenanbau, und Tiefland Systemen: Raised Fields mit geringer und Drained Fields mit guter Drainage (LAMBERT 1985).

In Venezuela wurde auf den marginalen Flächen der Savanne mit geringem landwirtschaftlichen Potential hauptsächlich Jagd- und Fischfang vermutet. Tatsächlich jedoch wurde vor Ankunft der Spanier intensive Landwirtschaft betrieben bei hohen Bevölkerungsdichten. Die prähispanischen Anbaumethoden bestanden neben "slash & burn plots" und "wet gardens", in der Konstruktion von Hochbeeten, v.a. an feuchten Standorten in der Savanne. Angebaute Nutzpflanzen waren Maniok, Kartoffeln und Mais (ZUCCHI 1985).

Durch die jährlichen und saisonalen Schwankungen des Wasserspiegels in der Küstenregion am Golf von Mexiko wurden die Hochbeete hier als ein Hydro-Agrarsystem betrachtet, das ganzjährigen Anbau ermöglichte. Zum Ende der Regenzeit wurden die Kanäle direkt am Fluß als Drainage benutzt um einen früheren Saattermin zu ermöglichen, in der Trockenzeit war noch Anbau auf den weiter vom Fluß entfernten, versumpften Flächen möglich. Mit dem Ziel der Risikominimierung und der Intensivierung funktioniert auch die aktuelle Landnutzung in diesem Gebiet (SIEMENS 1983; JEFFREY und WILKERSON 1983). SIEMENS (1985) vermutete auch, daß durch die ausgeprägte Saisonalität (Trocken- und Regenzeit) die Bedeutung der Hochbeete darin bestand, die Ernte zu einem günstigen Zeitpunkt, d.h. etwas eher als auf nicht überschwemmten Flächen während der Regenzeit stattfinden zu lassen. Wenn der Vorrat des Vorjahres schon verbraucht, und die diesjährige Ernte noch nicht reif war. Im südöstlichen Mexico, Quintana Roo, wurden 40 000 ha antike Hochbeete entdeckt, die in flachen versumpften Regionen angelegt wurden, um über geeignete Pflanzflächen während der Regenzeit zu verfügen. Da die Arbeitskosten zur Konstruktion der Hochbeete hoch waren, wird vermutet, daß mehrere Ernten pro Jahr durch die Ausnutzung der hohen Rest – Bodenfeuchte aus der Regenzeit während der Trockenzeit, möglich waren (GLIESSMAN et al. 1983, 1985).

Das Hauptverbreitungsgebiet von Hochbeeten in Lateinamerika mit 82 056 ha (SMITH et al. 1968, ERICKSON 1989) liegt in Peru und Bolivien am Titicacasee. Die Arbeit von LENNON (1983) beschäftigte sich mit der Form der Hochbeetanlagen auf peruanischer Seite des Titicacasees. Sie unterschied Hochbeete, die in direkter, versumpfter Seenähe liegen und solche, deren Kanäle durch Flußläufe gespeist wurden. Dabei wurden statistische Zusammenhänge zwischen der Form der Anlage von Hochbeeten und der Entfernung zum See oder zu Flüssen festgestellt. Als Ergebnis der Studien wurden die Hochbeete als hochorganisierte und gut angepaßte prähispanische Bewässerungssysteme identifiziert.

Die Hochbeete auf bolivianischer Seite des Titicacasees stammen aus der prehispanischen Tiwanaku – Kultur (800 v-1200 n Chr.). Für ein 3000 ha großes, antikes Hochbeetystem, das etwa 15 km südlich der untersuchten Flächen in dieser Arbeit ebenfalls in unmittelbarer

Seenähe liegt (Koani Pampa), bewies GRAFFAM (1992) durch archäologische Funde, daß diese Hochbeete nach dem Zerfall der Tiwanaku - Kultur von prähispanischen Aymara Gesellschaften rekonstruiert wurden. In der Region des Titicacasees spielte Weidewirtschaft mit Kameliden, vor allem mit zunehmender Entfernung zum See und dadurch zunehmender Marginalität, sowohl damals als auch heute eine wichtige Rolle (Hauptverbreitungs- und Domestikationsgebiet). Deshalb stellte er die These auf, daß die Hochbeete ein agropastorales System darstellten, das vor allem zur Absicherung der intensiven Weidewirtschaft (Kameliden) diene. Denn die jährliche Kalorienzufuhr der Hirten konnte nicht allein aus dem Fleisch gedeckt werden, und so war der Bedarf an intensiver Landwirtschaft mit hohen Erträgen gegeben. Diese Erträge lieferten die Hochbeete.

Agroökologische Evaluierungen von STAB et al. (1999) zeigten durch Feldexperimente im humiden Tiefland von Bolivien (Beni), daß die vorspanischen Techniken im Vergleich mit der heutigen Brandrodung für viele Kulturpflanzen deutlich höhere Erträge bringen. Im Beni stellen die prähispanischen Hochbeete mit dem Ziel der Drainage eine Alternative zu der praktizierten Landnutzung (slash & burn) dar.

ORTLOFF (1989, S.241ff) stellte bei den Hochbeeten auf dem Altiplano in Bolivien für den Frostmilderungsprozess die hohe Wärmespeicherfähigkeit des Bodens der Hochbeete in den Vordergrund, die sich in der Verlängerung des Entwicklungszyklus der Pflanzen auswirkt. Tagsüber erwärmten sich die Hochbeete durch die hohen Wassergehalte im Boden nur langsam, nachts wurde die Wärme länger gespeichert als im konventionellen Boden, da durch die hohe Bodenfeuchte eine entsprechend niedrige Abgabe der Wärme erfolgte. Die Bodentemperaturen waren höher als die Lufttemperaturen, so wurden die Wurzeln vor Frost geschützt.

In neueren Untersuchungen stellte SANCHEZ DE LOZADA (1996, S. 262, 1998, S.251) für den Frostmilderungsprozess der Hochbeete auf dem Altiplano folgende Theorie auf. Wesentliche Prozesse laufen über dem Boden ab. Feuchte Luft aus den Kanälen steigt durch natürliche Konvektion zur Plattform (Hochbeet) auf, und die abgekühlte Luft wird wieder zurück in die Kanäle abgeleitet ("frost drainage"). Wärmefluß von den Kanälen zur Plattform des Hochbeetes war zu vernachlässigen.

Das entspricht der bereits von RILEY und FREIMUTH (1979) aufgestellten Hypothese, daß die Hauptfunktion prähistorischer Hochbeetsysteme ("garden beds") die "Frost - Drainage" war, d.h. Kaltluftabfluß von den Hochbeeten in die Kanäle oder Furchen neben den Hochbeeten, in Regionen mit hohem Frostrisiko (Wisconsin und Michigan, USA) und deshalb nur marginal für die Landwirtschaft nutzbar.

DE LA CUBA et al. (1994, S.45) stellten die Hypothese auf, daß durch die signifikanten Unterschiede in der Amplitude der Minimumtemperaturen von 10 cm unter der Wasseroberfläche und 10 cm darüber (in Frostnächten 9 °C (7,1 °C und - 2 °C)), die Kanäle das Absinken der Minimumtemperaturen verlangsamen und damit die Dauer und die Intensität eines Frosts kürzen und mildern.

Auf Hochbeeten wurden fast ausnahmslos höhere Erträge als auf konventionellen Feldern gemessen (MORALES et al. 1998, S.32; VARGAS et al. 1998, S.31; VILLANUEVA et al. 1994, S.40-42), wobei genaue Angaben über die Erhebung der Erträge häufig fehlen.

Bisherige Untersuchungen stellten deshalb die Temperaturen als wichtigsten Faktor für die Erträge in den Mittelpunkt. Vermutet wird in diesen Arbeiten, daß die Frostmilderung hinsichtlich Intensität und Dauer der entscheidende Vorteil der Hochbeete im Vergleich zum konventionellen Anbausystem ist (SANCHEZ DE LOZADA 1996, 1998; VACHER et al. 1992; AGUILAR et al. 1994; DE LA CUBA et al. 1994; VILLANUEVA et al. 1994; DURAN 1990).

Auch die Aspekte im Hinblick auf die Wirkung der Bewässerung wurden von mehreren Autoren untersucht (SANCHEZ DE LOZADA 1996, 1998; UZQUIANO CARREÑO 1995; VARGAS et al. 1998).

Generell wird den Hochbeeten eine höhere Bodenfruchtbarkeit zugeschrieben. So ermittelten MORALES et al. (1997) im Boden (0 -30 cm) der Hochbeete eine höhere Kationenaustauschkapazität als im konventionellen System. In dieser Studie über die Salinität in Hochbeeten und konventionellen Feldern in Aygachi, 15 km südlich zu den in dieser Arbeit untersuchten Flächen, wurden Unterschiede in der Zusammensetzung der Salze festgestellt. In den Hochbeeten bestanden sie hauptsächlich aus Sulfaten und Chlorid, während sie in den konventionellen Feldern ausschließlich aus Sulfaten zusammengesetzt waren. Darüber hinaus wurde gezeigt, daß unterschiedliche Düngungsstufen keinen Einfluß auf die Gehalte der löslichen und austauschbaren Kationen hatten (MORALES et al. 1997).

Auf den Untersuchungsflächen der vorliegenden Arbeit selbst wurde von MORALES et al. (1998) gezeigt, daß unterschiedliche organische Düngungsstufen und der Ertrag von Bitterkartoffeln nur auf Hochbeeten einen Zusammenhang aufwiesen. Die mikrobielle Biomasse und die Gehalte an N_{gesamt} waren in den Hochbeeten höher als im konventionellen System. Die unterschiedlichen organischen Düngungsstufen zeigten kaum Einfluß auf die Erhöhung der org. Substanz.

Weitere Arbeiten untersuchten die Zusammensetzung der Bodenfauna (insbesondere Regenwürmer) in Hochbeeten mit Monokultur und mit Fruchtfolge (ZURITA 1997) sowie die Populationsdynamik von freilebenden, stickstofffixierenden Bakterien im Boden von Hochbeeten und konventionellen Feldern (MIRANDA 1998).

Untersuchungen zu den Bodennährstoffgehalten in den beiden Anbausystemen existieren nur vereinzelt. Umfassende, detaillierte und langfristige Untersuchungen zur Bodennährstoffdynamik liegen kaum vor.

1.3 Fragestellung und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, ob neben den Faktoren Temperaturhaushalt und Wasserversorgung die Nährstoffversorgung eine weitere bedeutende Einflußgröße hinsichtlich des Ertrages darstellt. Als Arbeitshypothese wird davon ausgegangen, daß die Erträge auf Hochbeeten aufgrund günstigerer Mikroklima- und Nährstoffbedingungen signifikant höher sind als auf konventionellen Feldern. Zu diesem

Zweck erfolgt eine ausführliche Analyse der agroökologischen Standortbedingungen auf Hochbeeten (raised fields) und bei konventionell bewirtschafteten Feldern auf der nördlichen Hochebene (Altiplano) am Titicacasee in Bolivien. Untersucht werden dabei Luft- und Bodentemperaturen und die Bodenfeuchte. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt jedoch auf der detaillierten Untersuchung der Nährstoffdynamik in beiden Systemen bei einem realistischen Düngungsniveau von $7,5 \text{ t ha}^{-1}$.

2. Einführung in das Untersuchungsgebiet

Die untersuchten Flächen befanden sich bei Batallas, etwa 70 km nordöstlich von der Hauptstadt La Paz entfernt auf der Hochebene (Altiplano) in unmittelbarer Nähe des Titicacasees. Die Höhe betrug 3820 m ü. NN bei 68° 35' westlicher Länge und 16° 20' südlicher Breite.

2.1 Klima und Vegetation

Das Untersuchungsgebiet wird, bedingt durch seine Nähe zum Titicacasee in die warmen, wintertrockenen Klimate Cwb eingeordnet. Mit C: kältester Monat zwischen 18 °C und minus 3 °C; w = Haupttrockenzeit im Winter, regenreichster Monat der wärmeren Jahreszeit bringt mehr als zehnmal so viel Niederschlag wie der regenärmste der kälteren; b = Temperatur des wärmsten Monats unter 22 °C, mindestens 4 Monate über 10 °C (MUÑOZ-REYES 1977). Der Titicaca - See bildet eine tektonische Senke im westlichen Vorland der Ostkordillere (Cordillera Real), mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 660 mm, einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8,4 °C und einem ausgeprägten Tageszeitenklima (AHLFELD 1974, ROCHE 1993). Dabei werden die Niederschläge in der Titicacaseeregion eingeteilt in 15 – 35 % passatische, 5 – 15 % advective und 55 – 75 % zenitale Niederschläge (GRAF 1998).

Der Einfluß des Sees kann die Jahresdurchschnittstemperaturen, die bei einer Höhe < 4000 m von 7 – 10 °C variieren, um maximal 2 °C anheben. In Seenähe liegen die Jahresdurchschnittstemperaturen bei 8 °C und höher. Der Titicacasee mildert vor allem die Amplitude der Temperaturschwankungen. Die niedrigsten Temperaturen treten im Juli auf, die höchsten von Dezember bis März während der Regenzeit (ROCHE et al.1993).

Während der Vegetationszeit kommt es zu Frösten und Dürreperioden, die die landwirtschaftliche Produktion auf der Hochebene (Altiplano) begrenzen. Der Titicacasee mindert jedoch das Risiko von Trockenheit erheblich und Nachtfröste treten kaum noch auf (VACHER, J., LIBERMAN, M. 1993). Mit zunehmender Entfernung zum See kommt es jedoch, auch bei den untersuchten Flächen, wieder zu Nachtfrösten.

Nach der hygrothermischen Gliederung für tropische Gebirgshöhenstufen gehört das Untersuchungsgebiet zur „Tierra fría“, die sich von 2400 – 3800 m ü. NN ausdehnt. Sie ist gekennzeichnet durch Jahresmitteltemperaturen von 6 bis 10 °C, regelmäßiges Auftreten von Frösten und durch Niederschläge, die geringer als 1000 mm sind. Die Höhenstufen der tropischen Gebirge unterscheiden sich durch die Abnahme der Temperatur - Jahresmittel bei gleichbleibend geringer Tagesschwankung. Die thermischen Verhältnisse ändern sich weitgehend linear, die hygrischen Verhältnisse unregelmäßig (MÜLLER-HOHENSTEIN 1981).

Für die Höhenstufe der trockenen innerandinen Hochlagen ist die kennzeichnende Vegetationsgesellschaft die halbfeuchte Puna. Sie ist gekennzeichnet durch frostharte Gräser und Hartpolsterpflanzen, mit xeromorphen Merkmalen, und durch offene Strauch- und Buschformationen (ELLENBERG 1983). Bei den Gramineen überwiegen die Gattungen

Festuca, Stipa und Calamagrostis. Dabei bildet die Gattung Stipa Horstgräser aus, das Ichu-Gras. Es bildet den Grundstock der Puna Vegetation (ERFMEIER, HILKER 1998).

2.2 Hydrologie

In Bolivien gibt es drei große Einzugsgebiete. Während im Norden das Amazonas- und im Südwesten das La Plata - Einzugsgebiet unterschieden werden, wird die Hochfläche (Altiplano), mit Nord - Süd Ausdehnung zwischen der West- und der Ostkordillere als innerandines, abflußloses (endorheisches) Becken bezeichnet. Der Titicaca - See im Norden des Altiplano ist über den einzigen Abfluß (Desaguadero) mit dem weiter südlich liegenden Poopó-See verbunden (AHLFELD 1974). Dieser entwässert wiederum in südlicher Richtung in den ersten Salzsee (Salar de Coipasa). Hier befindet sich auch eine Wasserscheide, da der südlichere Salzsee (Uyuni) von dem Río Grande del Lipez gespeist wird (ROCHE 1993).

Das Einzugsgebiet des Titicacasees liegt hauptsächlich in Peru, mit vier Hauptzuflüssen aus dem Norden und Westen (Kordillere). Das Wasserniveau des Sees kann im Laufe des Jahres um rund 4 cm schwanken, und bestimmt so die dortige Landwirtschaft (GRAF 1998). Der größere Teil des Titicacasees (3 / 4) befindet sich in Peru (ROCHE 1993) und wird durch eine Seeenge, die Straße von Tiquina, vom kleinen Teil des Sees auf bolivianischer Seite getrennt. Die untersuchten Flächen lagen in 10 km Seenähe am westlichen Teil des kleinen Sees, im Einzugsbereich der aus der Ostkordillere entwässernden Flüsse. Das Gebiet wird während der Regenzeit von den periodischen Flüssen der nahe gelegenen Ostkordillere geprägt. Diese bilden auch die Grundlage für das Bewässerungssystem Khara-Kota, von dem das Bewässerungswasser in den Kanälen der Hochbeete stammte. Daneben gibt es im Untersuchungsgebiet noch ganzjährig wasserführende Flüsse, wie z.B. den río Batallas.

2.3 Geologie und Böden

Die rund 4000 m hoch gelegene, innerandine abflußlose Depression des Altiplano wird im Westen von der vulkanreichen Westkordillere, im Osten von der Ostkordillere (Cordillera Real) begrenzt, die kaum Vulkane aufweist.

Während der Hebung der West- und der Ostkordillere ab mittlerem Tertiär wurde der Altiplano grabenartig abgesenkt. Diese Absenkung dauerte bis in das Jungtertiär und der Altiplanogaben wurde dabei vorwiegend mit klastischen Sedimenten der Ost- und Westkordillere aufgefüllt. Dabei entstand eine kontinentale Schichtenfolge von mehr 10 000 m Mächtigkeit. Durch glaziale und fluviatile Ablagerungsprozesse im Quartär (quartäres Lockermaterial) wird die heutige morphologische Ausbildung des Altiplano geprägt (POHLMANN 1976, AHLFELD 1972).

Die Ostkordillere wird aus gefalteten, altpaläozoischen, klastischen Sedimentiten (Sandsteine, Schiefer, Quarzite) aufgebaut. Die stratigraphische Abfolge lautet: quartäre Lockersedimente, Granit und Sandstein (Tertiär), Sandstein (Kreide), Feinsandstein (Devon), Schiefer (Silur), Feinsandstein (Oberstes Ordoviz) und Tonschiefer, Sandsteinlagen, Quarzite und marine Sedimentite (Ordoviz) (POHLMANN 1976).

Das Ausgangsgestein für die Böden des Altiplanos sind demnach quartäre Lockersedimente: Sandsteine, Quarzite und schwarze Schiefer. Letztere bestehen vorwiegend aus feinsten Hellglimmern (Muscovit). Es ist kein Kalk vorhanden (GEOLOGISCHE KARTE ACHACACHI 1995).

Durch den hohen Grundwasserstand (Niederschlag, Seenähe) während der Vegetationszeit entwickeln sich im Untersuchungsgebiet vor allem hydromorphe Böden mit ausgeprägten Reduktionshorizonten. Bei den untersuchten Flächen der konventionellen Felder war eine klare Horizontabfolge Ah – Go - Gr zu sehen, mit einer deutlich erkennbaren Grenze zwischen Oxidations- und Reduktionshorizont. Bodentyp bei den untersuchten Flächen war deshalb ein Gley. In der FAO Systematik wird er mit den Stauwasserböden als Gleysol bezeichnet (Tab. 1 a und b). Die Böden der Hochbeete können durch die Konstruktion bedingt als anthropogene Böden bezeichnet werden. Bei der Konstruktion der Hochbeete wurde der Oberboden aufgeschichtet, und tiefer liegende Bodenschichten kamen an die Bodenoberfläche, so daß der ursprüngliche Oberboden den aktuellen Unterboden der Hochbeete bildete. Die Horizonte waren vermischt. Der 2. Horizont von 20 – 45 cm war ein deutliches Gemisch aus dem ursprünglichen Gley - Oxidationshorizont Go und dem Reduktionshorizont Gr (Tab.1 a). Bei den konventionellen Feldern fand hingegen eine natürliche Bodenentwicklung statt und die Horizontabfolge blieb erhalten.

An den Stellen, an denen der Boden für die Konstruktion der Hochbeete entnommen wurde, entstanden die Kanäle. Bei den Hochbeeten trat eine verfestigte Kiesschicht durch sekundäre CaCO_3 - Bildung auf (Tab. 1 a). Bei Grundwasserböden werden bei diesem Prozess der Carbonatisierung Calciumhydrogencarbonate aufwärts verlagert und als Carbonatkonkretionen akkumuliert, weil die Konzentration der Bodenlösung an Ca – Hydrogencarbonat durch Wasserentzug steigt. Bei stärkerer Kalkanreicherung liegt ein festes Kittgefüge vor (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S. 381).

2.4 Landnutzung

Die Hochebene (Altiplano) umfaßt bei einer Höhe von 3800 – 4200 m eine Fläche von 100 000 km² bis 180 000 km² mit 250 000 ländlichen Einwohnern, mehr als ¼ der bolivianischen Landbevölkerung. Während die Hochebene sonst gering besiedelt ist (30 Einwohner / km²), steigt die Bevölkerungsdichte in Seenähe auf 100 und mehr Einwohner / km² an. Damit nimmt auch die Intensität der Landnutzung zu (FRANCOIS et al.1998). Die Landnutzung ist an die Niederschläge gebunden, die von Norden nach Süden kontinuierlich abnehmen 700 mm – 250 mm / Jahr. Während im Norden deswegen noch Kartoffeln, Quinoa, Ackerbohnen und Gerste angebaut werden können, ist im Süden nur noch Busch- und Strauchvegetation verbreitet (ALLIROL et al. 1992). Trotz der Frost- und Dürregefahr, ist der Altiplano eine der landwirtschaftlichen Hauptanbauzonen des Landes (VACHER et al. 1992). Neben extensiver Viehhaltung auf überwiegend versumpften Weideflächen ist Ackerbau auf kleinparzellierten Flächen zur Subsistenzsicherung weit

verbreitet. Dabei wird von den Kleinbauern das Prinzip der Risikoverteilung verfolgt (HANAGARTH 1989).

Hauptanbaukulturen sind Wurzel- und Knollenfrüchte, die mit großer Diversität auftreten. Neben der „Andenkartoffel“ (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigenum*) werden die frosttoleranten Bitterkartoffeln, *Solanum juzepczukii*, *curtilobum* und *ajanhuiri* bis 4600 m ü. NN angebaut. Weitere Knollenfrüchte sind: Oca (*Oxalis tuberosa*), Olluco (*Ullucus tuberosus*) und Isaño (*Tropaeolum tuberosum*). Bei Getreide überwiegt der Anbau von Gerste als Viehfutter, Weizen und Hafer. Eine wichtige Rolle spielen auch Pseudozerealien, wie Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) und Cañahua (*Chenopodium pallidicaule*). Diese sind nicht nur an die Höhenlage angepaßt, sondern liefern auch ernährungsphysiologisch höherwertige (Mineralstoffe) als z.B. der von den Spaniern eingeführte Weizen. Bei den Leguminosen dominieren Ackerbohnen (*Vicia faba*) und Süßlupinen (*Lupinus mutabilis* sweet).

Tab. 1: Beschreibung eines Bodenprofils a) auf Hochbeeten und b) auf konventionellen Feldern

a)

Tiefe	Horizont- bezeichnung	Skelett	Boden- art	Mineral- bestand	Gefüge	Farbe	Humus- gehalt	Aggregat- stabilität	Lagerung	Lagerungs- dichte n = 3	Durch- wurzelung	Feuchte
0-20 cm	Ap	0 %	Tu 3	C, starke Geruchs- bildung (H ₂ S)	Bröckel- gefüge	2,5 Y 4 / 2	H 3	2	mittel	1,23	W 4	feucht
20-45 cm	Go und Gr (gemischt)	0 %	Tu 4	stark carbo- nathaltig, Geruchs- bildung, schwarze und rote Verfär- bungen	Kohärentge- füge, zu- sammenge- kittet durch Oxide und reduzierte Merkmale	5 Y 3 / 1	H 4	2	mittel	1,23	W 5	stark feucht
45-60 cm	Go	> 75 %	Sl 4	C, nur Oxidations- erschei- nungen, carbonat- haltige, verkittete Kiesschicht	Kittgefüge	2,5 Y 4 / 4	H 1	6	mittel	1,62	W 2	naß
60-95 cm	Gr	0 %	Tu 2	C, nur schwarz- graue Reduktions- flecken, keine Carbonate	Kohärent	5 Y 4 / 2	H 2	2-3	mittel	1,19	W 2	stark naß

b)

Tiefe	Horizont- bezeichnung	Ske- lett	Boden- art	Mineral- bestand	Gefüge	Farbe	Humus- gehalt	Aggregat- stabilität	Lagerung	Lagerungs- Dichte n = 3	Durch- wurzelung	Feuchte
0-10 cm	Ap	0 %	Tu 4	co, kaum Fe-Oxide	Bröckel	10 YR 4 / 3	H 3	2-3	mittel	1,13	W 4	stark feucht
10-80 cm	Go	0 %	Ut 4	co, durch- gehend Fe- Oxide	Kohärent	10 YR 4 / 2	H 2	1-2	mittel	1,27	W 3	stark feucht
80-90 cm	Gr	0 %	Tu 2	co, schwarze, reduzierte Mn-Flecken	Kohärent	5 Y 3 / 1	H 1	2-3	mittel- gering	1,27	W 3	stark naß

3. Material und Methoden

3.1 Luft- und Bodentemperaturen

3.1.1 Lufttemperaturen

Für den Zeitraum Dezember 1997 bis Februar 1998 wurden täglich die Minimumtemperaturen in 10 cm Höhe in beiden Systemen während der Vegetationszeit gemessen. Alle Messungen erfolgten mit fest installierten Thermosonden (Projektdate PROSUKO).

3.1.2 Tagesverlauf der Bodentemperaturen

Der Zeitpunkt für die eigenen Messungen des Tagesverlaufs der Bodentemperaturen in den Hochbeeten und im konventionellen System war die Mitte der ersten Vegetationszeit 1997 / 98, im März 1998. Die Messungen wurden an 6 aufeinanderfolgenden Tagen stündlich, während der Mittagszeit zweistündlich, von 4.00 Uhr bis 20.00 Uhr durchgeführt. Aus den sechs Tageswerten je Stunde wurde ein Mittelwert errechnet. In den Hochbeeten wurde am Anfang und am Ende der Furche, in je 80 cm Entfernung zum Rand, und in der Mitte, in 2 m Entfernung zum Beetrand, gemessen. Die Meßtiefen lagen in 2 cm, 10 cm und 30 cm Tiefe. Bei den Hochbeeten wurde. Verwendet wurden handelsübliche Thermometer.

Für denselben Zeitraum 9. - 15. 3. 1998 wurden stündliche Daten mit fest installierten Thermosonden (Data Logger Campbell Scientific CR 10, Projektdate PROSUKO) in 10 und 30 cm Bodentiefe in der Mitte der Hochbeete und im konventionellen System, erhoben und elektronisch gespeichert die als Kontrolle für die eigenen Messungen dienen.

3.1.3 Temperaturverlauf während der Vegetationszeit

Für die gesamte Vegetationszeit, Oktober 1997 bis März 1998 wurden die täglichen Minimumtemperaturen in beiden Systemen in 10 cm und 30 cm Bodentiefe gemessen und daraus Monatsmittelwerte gebildet.

Für den Beginn der zweiten Vegetationszeit, Oktober - Dezember 1998 wurden die mittleren, die maximalen und die minimalen Tagestemperaturen in zwei Bodentiefen (10 cm, bzw. 30 cm) erfaßt. Alle Messungen erfolgten mit fest installierten Thermosonden (Projektdate PROSUKO).

3.2 Bodenwasserspannungen

Zur Beschreibung der Wasserbewegung im Boden wurden Tensiometer in 15 cm und 25 cm Tiefe eingesetzt (Projektdate PROSUKO). Gemessen wurde auf den Hochbeeten am Anfang und am Ende von Feld 8 und am Anfang von Hochbeet 4. Angeordnet wurden die Tensiometer jeweils im Querprofil, d.h. am östlichen Rand, in der Mitte sowie am westlichen Rand des Hochbeetes. Auf den konventionellen Feldern wurde an zwei Standorten gemessen, da Randeefekte hier wegfallen. In der Vegetationszeit 1997 / 98 wurde in folgenden

Zeiträumen gemessen: Mitte Dezember 5 Messungen im Abstand von zwei Tagen, im Januar 2 Messungen pro Woche, in den Monaten Februar und März Messungen im 2-3 Tagesabstand und im April wurde mit 5 Messungen die erste Woche beschrieben. Insgesamt gab es 52 Messungen. Die Ablesung erfolgte morgens in (cm Wassersäule WS). Die Niederschläge wurden mit insgesamt 135 Messungen während der Vegetationszeit von 182 Tagen (Oktober bis Ende März) dokumentiert.

Der Meßbereich für Tensiometer lag bei 0 bis 800 cm Wassersäule WS, das entspricht einem pF – Wert von 0 bis 3 (HARTGE / HORN 1992, S.138) oder einem Bereich von 0 bis 882,9 hPa. Für die Darstellung der Bodenfeuchte in hPa während der Vegetationszeit 1997 / 98 wurden die direkten Meßwerte in cm Wassersäule (WS) 1 : 1 angegeben (1 cm WS = 1 hPa). Das entspricht dem Matrixpotential. In den graphischen Darstellungen (Kap. 4.2, Abb. 6 bis 9) wird der Zahlenwert ohne negatives Vorzeichen unter dem Begriff Wasserspannung verwendet (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S.175).

Um die Richtung der Bodenwasserbewegung darzustellen, wurde der hydraulische Gradient aus dem Hydraulischen Potential H (Matrixpotential + Gravitationspotential) berechnet. Bezugspunkt ist hierbei die Bodenoberfläche. Das Hydraulische Potential berechnet sich aus den Tensiometermeßwerten, von denen die Bodentiefe (15 cm und 25 cm (= Gravitationspotential) abgezogen wird. Das hydraulische Potential in 15 cm Tiefe wird von dem in 25 cm Tiefe subtrahiert und durch die Differenz der Bodentiefen (25 cm - 15 cm) dividiert. Als Ergebnis erhält man den hydraulischen Gradienten (hPa / cm), der für die Mitte zwischen zwei Punkten (15 cm, 25 cm), also hier für die Bodentiefe 20 cm, gilt. Bei positivem Gradienten erfolgt eine aufwärts gerichtete, bei negativem Gradienten eine abwärts gerichtete Bodenwasserbewegung. Anschaulicher ist die Vorstellung der hydraulischen Gesamtpotentiale in zwei Punkten, in 25 cm und in 15 cm Bodentiefe. Die Bodenwasserbewegung erfolgt vom größeren zum kleineren Potential (AHL 1992, S.179). Der Variationskoeffizient der Bodenfeuchte in % wurde berechnet aus: (Standardabweichung / mittleres Matrixpotential (cm WS ohne Vorzeichen)) * 100.

3.3 Bodennährstoffgehalte

3.3.1 Versuchsanlage und Untersuchungszeitraum für die Bodenbeprobung beider Landnutzungssysteme (Basis- Querschnittsbeprobung (Mikroprofil))

Auf den Hochbeeten und den konventionellen Feldern wurden je 8 Versuchsflächen mit einer Fläche von je 40 m² (4 m Breite, 10 m Länge) angelegt. Vollständige Randomisation konnte nicht erfolgen, da vorgegebene Flächen beprobt werden mußten. Die Beprobung für die Feststellung der bodenchemischen Parameter erfolgte an drei Zeitpunkten, zum Beginn (Z 1) und zum Ende (Z 2) der ersten Vegetationszeit 1997 / 98 und zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) 1998. Die Proben wurden mit einem Bohrstock aus dem Oberboden (0 - 20 cm) und dem Unterboden (20 - 40 cm) entnommen. Dazu wurden die Versuchsflächen mit 24 Einstichen beprobt (drei Linien á 10 m mit jeweils 8 Einstichen). Der Boden wurde

homogenisiert und Mischproben angefertigt. Um Randeﬀekte zu vermeiden wurden die Ränder der 4 - 5 m breiten Hochbeete nicht beprobt.

Auf fünf Hochbeeten wurde zu Beginn der 2. Vegetationszeit 1998 / 99 im Querprofil der Ober- (0 - 20 cm) und Unterboden (20 - 40 cm) beprobt, um die Mikrovariabilität der Nährstoffe im Boden der Hochbeete darzustellen. Die Entnahme der Mischproben mit dem Bohrstock erfolgte von Rand zu Rand im Abstand von 80 cm (5 Einstiche). Das wurde auf einer Länge von 50 m 20 x wiederholt (100 Einstiche), da die Hochbeete zum Ende trockener wurden (Gesamtlänge der Hochbeete 90 m). Die konventionellen Felder wurden, getrennt nach Ober- und Unterboden, 5 x im Abstand von 80 cm mit jeweils 20 Einstichen beprobt.

3.3.2 Elektrische Leitfähigkeit und pH-Wert

Für sämtliche Analysen wurde gesiebter (< 2 mm), lufttrockener Feinboden verwendet. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in einem Boden-dest.Wasser-Extrakt (Verhältnis 1 : 2,5) bestimmt. In dem Überstand des Gemischs wurde nach 1 h Schütteln und 0,5 h Absetzen mit einem Conductometer LF 191 ohne Temperaturkompensator der Firma WTW (Wissenschaftliche Technische Werkstätten GmbH) die elektrische Leitfähigkeit bestimmt (KRETZSCHMAR 1994, S.303).

Der pH-Wert wurde direkt anschließend in demselben Extrakt mit einem pH – Meter gemessen.

3.3.3 Organische Substanz

Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs im Boden erfolgte durch den sog. nassen Aufschluß (Walkley and Black). Dabei wird der organische Kohlenstoff im Boden mit Kaliumdichromat (in Schwefelsäure) zu CO₂ oxidiert. Die Menge des durch die Schwefelsäure reduzierten Kaliumdichromats entspricht annähernd dem vorhandenem org. Kohlenstoff. Die Menge des Dichromats, das nicht mit dem org. Kohlenstoff reagiert hat, wird mit Eisensulfat bis zum Farbumschlag (braun über grün) titriert und so indirekt der org. Kohlenstoffgehalt festgestellt (VAN REEUWIJK 1993, PAGE et al. 1982). Diese Methode ist weit verbreitet, da sie schnell und einfach durchzuführen ist.

Da der Anteil an org. Kohlenstoff in der organischen Substanz verschiedener Böden schwankt, wird mit Faktoren nur annäherungsweise von der Konzentration des org. Kohlenstoff im Boden auf die organische Substanz geschlossen. Für Ober- und Unterböden haben sich Faktoren von 1,9- 2,5 als geeignet erwiesen. In der vorliegenden Arbeit wurde der ältere *Van Bemmelen Faktor 1,724* verwendet, der von der Annahme ausgeht, daß die org. Substanz zu 58 % aus org. Kohlenstoff besteht (PAGE et al. 1982).

Die Ergebnisse geben damit eine Mindestkonzentration an organischer Substanz an, die jedoch noch höher liegen kann, falls mehr C_{org.} enthalten ist. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit C_{org.}-Gehalten müssen die Werte durch 1,724 dividiert werden.

Es wird davon ausgegangen, daß 75 % des organischen Kohlenstoffs (C_{org.}) mit dieser Methode (Walkley & Black) erfaßt wird (LANDON 1992, S. 139).

3.3.4 Gesamtstickstoffgehalt (N_{gesamt}) bestimmt mit dem semimicro Kjeldahl-Verfahren

Der Gesamtstickstoffgehalt im Boden wurde mit der Kjeldahl-Methode (nasse Oxidation) bestimmt. Unter dem Gesamtstickstoff wird der sog. KJELDAHL – Stickstoff ($\text{NH}_3\text{-N}$; N_{Kjel}) verstanden. Er umfaßt summarisch die Stickstoffformen Harnstoff, Ammonium, Nitrat und Nitrit (KRETZSCHMAR 1994).

Da ein Großteil des Stickstoffs im Boden in organisch gebundener Form vorliegt, muß dieser zur Messung in Ammonium ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) überführt werden. Beim Kjeldahl - Prinzip geschieht das durch Sieden in konz. Schwefelsäure (1 g Boden, 1 g Selen – Reaktivgemisch (Katalysator) und 5 ml H_2SO_4). Das Sieden erfolgte auf Heizspiralen. Anschließend wurde in einem Destillationsgerät die Destillation des mit NaOH alkalisierten Aufschlusses durchgeführt, bei der gasförmig NH_3 frei wird. Das NH_3 wird aufgefangen mit Borsäure und Indikator. Es entsteht Ammoniumborat, das mit 0,001 N H_2SO_4 titriert wird wobei erneut NH_4^+ entsteht.

Die Grenze der Methode liegt bei den aromatischen und heterocyclischen Verbindungen mit randständigen N-Gruppen, die unvollständig erfaßt werden (KRETZSCHMAR, 1994). Die Methode ist nicht geeignet organischen Stickstoff in heterocyclischen Verbindungen wie z.B. Nicotinsäure oder Pyridin zu bestimmen (PAGE et al. 1982).

3.3.5 Phosphorextraktion nach Olsen

Die Methode eignet sich für kalkhaltige, neutrale und alkalische Böden (VAN REEUWIJK, 1993). DE MELLO (1998) gibt an, daß die Methode generell geeignet ist auch in Redoxböden des Nassreisanbaus die Phosphor Verfügbarkeit zu bestimmen.

Mit der relativ „sanften“ Extraktionslösung Natriumbicarbonat (0,5 M, pH 8,5) soll aus dem im Boden vorhandenen Pool der pflanzenverfügbare Anteil gelöst werden. Die Olsen - Methodik kommt dem Intensitätsfaktor (Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung) nahe, weil nur die relativ leichtlöslichen Anteile erfaßt werden (PAGEL 1982, S.106). Bei sauren Böden (pH < 4) wird dagegen nach der Methode von Methode Bray & Kurtz mit einer starken Extraktionslösung (HCl mit Ammoniumfluorid) vorgegangen.

Die P - Bestimmung nach Olsen gehört zu den sehr empfindlichen Molybdänblau – Methoden, die sowohl für kleine P-Mengen (Verfügbarer Phosphor, der mit verschiedenen Extraktionslösungen aufgeschlossen wird) als auch für die Bestimmung von P_{gesamt} geeignet sind (PAGE et al. 1982, S.403)

Sie funktionieren nach dem Prinzip, daß nach der Extraktion durch Zugabe von saurem Reaktivgemisch (50 ml konz.Schwefelsäure, 15 ml Ammoniummolybdat 4 %, 30 ml Ascorbinsäure 1,75 %, 5 ml Kaliumantimoniumtartrat 0,275 %, 200 ml dest. Wasser) die Orthophosphat - Ionen im Filtrat einen Phosphor – Molybdat - Komplex bilden. Dieser wird mit Ascorbinsäure zu Molybdänblau reduziert. Mit steigender Konzentration des Phosphors im Gemisch nimmt die Farbtiefe zu (PAGE 1982). Die quantitative Bestimmung erfolgte kolorimetrisch bei 880 nm am Spektrophotometer.

Die Extraktion (Natriumbicarbonat 0,5 M, pH-Wert 8,5 mit Natronlauge) erfolgte im Verhältnis 1 : 20 (Boden 2,5 g : Extraktionslösung 50 ml).

Die Nachweisgrenze dieser Methode liegt bei ca. 2,0 mg kg⁻¹ (lufttrockener Boden). Die Methode ist zu ± 12 % reproduzierbar (MILLER und KOTUBY, 1995).

3.3.6 Austauschbare Kationen

Die Extraktion erfolgte mit NH₄⁺ac. (1,0 N), bei pH 7, im Verhältnis 1 : 10 (Boden 2,5 g : Extraktionslösung 25 ml). Nach 30 minütigem Schütteln und anschließender Filtration wurden die Filtrate verdünnt und nach Zugabe von 1 - %igem Lanthanoxid (Vermeidung von Eigenverbindungen bei Ca²⁺ und Mg²⁺ in der Flamme) am AAS gemessen.

VAN REEUWIJK (1993) rät, bei dieser Methodik Bodenproben mit einer elektrischen Leitfähigkeit von > 0,5 mS cm⁻¹ mit Ethanol (80 %) zu perkolieren, um Kationen in der Bodenlösung auszuwaschen. Damit werden dann in der anschließenden Extraktion mit NH₄⁺ac. tatsächlich nur die austauschbaren Kationen erfaßt. Bestimmt wurden deshalb in der vorliegenden Arbeit die extrahierbaren, d.h. in der Bodenlösung befindlichen und austauschbaren Kationen Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ und Na⁺, weil bei einigen Proben durch höhere Leitfähigkeit auch die Kationen in der Bodenlösung miterfaßt wurden.

Da im Boden der Hochbeete Carbonate vorhanden sind (Tab. 1 a), und die Extraktionslösung NH₄⁺ac. einen Teil des CaCO₃ im Boden mit in Lösung bringt (PAGEL 1982, S.39), entstanden leicht überhöhte Werte für das austauschbare Ca²⁺.

Die Nachweisgrenze der Methode liegt für K⁺ bei 5 kg ha⁻¹, mit einem Meßbereich von Kalium-Bodenkonzentrationen von 50 - 1000 kg ha⁻¹, für Ca²⁺ bei 10 kg ha⁻¹ (Meßbereich 500-2000 kg ha⁻¹), für Mg²⁺ bei 5 kg ha⁻¹ (Meßbereich 50-500 kg ha⁻¹) und für Na⁺ bei 2 kg ha⁻¹ (Meßbereich 10 - 250 kg ha⁻¹) (COUNCIL ON SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS 1992, S. 13ff.).

3.3.7 Pflanzenverfügbares Natrium, Kalium und Calcium nach Egner-Riehm

Die Methode verwendet als Extraktionsmittel organische Säuren, die auch von Pflanzenwurzeln ausgeschieden werden. So wird versucht, das Aufschlußvermögen der Pflanzen für Nährstoffe im Boden nachzuempfinden und den Anteil an Nährstoffen im Boden zu ermitteln, der für die Pflanze verfügbar ist. Das Verfahren erfaßt pflanzenverfügbare Nährstoffe, die nicht immer mit austauschbaren Nährstoffen, bzw. austauschbaren Kationen (Extraktion mit NH₄⁺ac., pH 7) gleichgesetzt werden können (SCHLICHTING et al. 1995).

Bei einem Verhältnis Boden – Extraktionslösung (pH 3) von 1: 20 (5 g : 100 ml) wird nach 4 h Schütteln das Filtrat im Flammenfotometer gemessen.

3.3.8 Bodenprofile

Auf den Hochbeeten und auf den konventionellen Feldern wurde gegen Ende der Vegetationszeit ein Bodenprofil beschrieben. Die Feldbodenaufnahme erfolgte nach den Anleitungen der AG Bodenkunde (1982).

Die Lagerungsdichte, bzw. die scheinbare Dichte, wurde mit Stechzylindern 100 cm^3 bestimmt (3 Wiederholungen pro Horizont). Bei der scheinbaren Dichte werden im Unterschied zur "normalen" Dichte, beim Volumen sämtliche Hohlräume und Poren im Volumen mitberücksichtigt (KRETZSCHMAR 1991).

3.3.9 Bewässerungswasser der Kanäle

Die Probenahme des Bewässerungswassers der Kanäle erfolgte gegen Ende der 2. Vegetationszeit (1998/99) im Februar 1999. Beprobte wurden in Fließrichtung: der Kanalanschluss, die Kanalmitte und das Kanalsende genommen. Es wurden 5 Kanäle beprobte, die Kanäle hinter Hochbeet 3, 4, 8, 10 und 13. Die Probe am Kanalanschluss bei Hochbeet 13 repräsentiert die Qualität des Bewässerungswassers am Zulauf.

Die Elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert wurden direkt in der Probe gemessen (Labor), mit einer Zeitverzögerung von 2 h. Die Messung der Kationenkonzentrationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) erfolgte nach zweimaliger Verdünnung am AAS. NH_4^+ -N wurde 2 h nach der Beprobung destilliert. Dazu wurden 50 ml Wasserprobe mit 3 Tropfen Phenolphthalein und einem Löffel Magnesiumoxid versetzt, destilliert, und in einen Erlenmeyer-Kolben mit Borsäure und Indikator überführt. Anschließend wurde mit 0,0

3.4 Statistische Auswertung

Die zu den drei Zeitpunkten erhobenen bodenchemischen Parameter wurden mit zwei statistischen Methoden analysiert.

3.4.1 t - Test

Voraussetzung für die Anwendung des t - Testes ist die Normalverteilung der Daten. Eine Überprüfung der Daten in dieser Hinsicht zeigte für die Daten der konventionell bearbeiteten Flächen eine Normalverteilung, für die Hochbeete nur eine annähernde Normalverteilung. Tests zur Überprüfung wie Shapiro-Wilk und Kolmogorov-Smirnov konnten jedoch wegen des kleinen Stichprobenumfangs nur eingeschränkt angewendet werden.

Die Heterogenität in den Hochbeeten war höher als im konventionellen System (Mikroprofil, Bartlett-Test für Varianzhomogenität ist signifikant). Deshalb wird beim t - Test auf die Ergebnisse der getrennten Varianzen zurückgegriffen. Die Anzahl von Freiheitsgraden ist bei getrennten Varianzen niedriger. Dadurch werden die Ergebnisse besser abgesichert.

Gepüft wird durch den t-Test, ob sich zwei Gruppen (unabhängige Stichproben) hinsichtlich eines Merkmals signifikant unterscheiden. Verglichen werden dabei die Mittelwerte des Merkmals (siehe 3.6.1: 8 Versuchspartellen pro System, Einstiche usw.). Die Angabe eines

Signifikanzniveaus mit einem Schwellenwert (signifikant ist $< 0,05$) gibt Auskunft darüber, ob geringe Unterschiede bei den Mittelwerten noch signifikant sind.

In dieser Arbeit werden die Hochbeete und das konventionelle Landnutzungssystem als zwei Behandlungen oder zwei unabhängige Stichproben betrachtet. Der t - Test wurde für jeden Zeitpunkt (zu Beginn und Ende von Vegetationszeit 1 und zu Beginn von Vegetationszeit 2) unter Berücksichtigung beider Bodentiefen (jeweils Oberboden und Unterboden) für jeden einzelnen Parameter durchgeführt.

Dadurch sind Aussagen darüber möglich, welche Nährstoffkonzentrationen sich in Ober- und Unterboden der Systeme stark bzw. signifikant unterscheiden und welche Parameter bei beiden Systemen ähnlich sind, bzw. keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

3.4.2 Diskriminanzanalyse

Im Gegensatz zum univariaten t-Test handelt es sich bei der Diskriminanzanalyse um ein multivariates Verfahren.

Sie untersucht die Unterschiedlichkeit von Gruppen hinsichtlich mehrerer Variablen, in diesem Fall z.B. bodenchemische Parameter. Sie wird deshalb eingesetzt zur Beantwortung der Fragestellungen, ob sich die Gruppen, hier Landnutzungssysteme, durch die bodenchemischen Parameter signifikant unterscheiden und welche Parameter dabei von besonderer Bedeutung sind.

Da es sich in diesem Fall nur um zwei Gruppen handelt, Hochbeete und konventionelle Felder, ist die Diskriminanzanalyse identisch mit einer multiplen Regression. Die Systeme bilden die unabhängige und die erhobenen Parameter die abhängige Variable.

Die Diskriminanzanalyse gehört zu den Strukturen prüfenden Verfahren. Das bedeutet, entdeckte Strukturen und Zusammenhänge, hier z.B. durch den t - Test, werden überprüft, und evtl. weitere Zusammenhänge herausgearbeitet. Die Diskriminanzanalyse kann nicht dazu verwendet werden, Datenzusammenhänge zu entdecken und diese zu interpretieren, da statistische Zusammenhänge nicht unbedingt kausale Zusammenhänge bedeuten (BACKHAUS et al. 1996).

Der Unterschied zum t - Test besteht in der Standardisierung der Parameter. Dadurch werden die Einheiten der einzelnen Parameter nicht berücksichtigt, d.h. Skaleneffekte fallen weg. So wird eine Vergleichbarkeit aller erhobenen Parameter ermöglicht, z.B. von der org. Substanz mit der Elektrischen Leitfähigkeit. Der t - Test bewertet Unterschiede hinsichtlich der Signifikanz, wichtet sie jedoch nicht. Bei der Diskriminanzanalyse dagegen können die einzelnen Parameter gewichtet werden, d.h. Aussagen zur Bedeutung der Parameter hinsichtlich der Unterscheidung der Systeme können getroffen werden.

Bei der Durchführung der Diskriminanzanalyse wurde aufgrund der benötigten hohen Stichprobenanzahl nicht nach Bodentiefen unterschieden (der Stichprobenumfang muß mindestens doppelt so groß sein wie die Anzahl der erhobenen Parameter).

Die Diskriminanzanalyse gibt im vorliegenden Fall Antwort auf die Fragestellung, wieviel die erhobenen bodenchemischen Parameter zur Unterscheidbarkeit (Trennung) der beiden

Systeme beitragen, bzw. wieviel Prozent der Gesamtstreuung zwischen den Systemen durch sie erklärt wird (ähnlich des Bestimmtheitsmaßes r^2 bei Regressionsanalysen). Beträgt die kanonische Korrelation (entspricht r^2) 0,924 bedeutet das, daß alle erhobenen Parameter eben 92,4 % der Varianz zwischen den Systemen erklären, während sie bei 0,88 nur 88 % erklären. Bei einer schrittweisen Durchführung der Diskriminanzanalyse für die einzelnen Parameter wurde darüber hinaus deutlich, welcher Parameter am wichtigsten, zweitwichtigsten usw. bei der Unterscheidung der Systeme ist.

3.5 Erträge

3.5.1 Produktivität durch Einzelpflanzenenerträge

Das Alter der Hochbeete betrug zum Zeitpunkt der Untersuchungen 5 Jahre. Die Erträge der Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii*, var. Luki) beider Systeme wurden zum Ende der ersten Vegetationszeit 1997 / 98 festgestellt. Die Düngung der Versuchspartzen erfolgte in beiden Systemen mit $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ getrocknetem Rindermist zur Saat. Der Pflanzabstand betrug in beiden Systemen 30 cm, der Reihenabstand 75 cm. Dabei können Schwankungen durch manuelle Saat aufgetreten sein.

In jedem System wurden die Ernteproben aus den 8 Versuchspartzen (je 40 m^2), aus denen auch die Bodenproben für die Nährstoffanalysen stammten, entnommen. Um 5 Probeflächen von je 1 m^2 zu erhalten, wurde in jeder Versuchspartze 5 x eine Furche von 1,33 m Länge ($1 \text{ m}^2 / 0,75 \text{ m Reihenabstand} = 1,33 \text{ m}$) geerntet. Da auf dieser Länge bei einem Pflanzabstand von 0,3 m in jeder Furche 4,4 Pflanzen hätten geerntet werden müssen, wurden in 4 Furchen 4 Pflanzen und in der fünften 6 Pflanzen geerntet. Die Anzahl der geernteten Pflanzen betrug somit pro Partze 22 Einzelpflanzen und daraus folgend in jedem System insgesamt 176 geerntete Pflanzen.

Der Einzelpflanzenenertrag pro System wurde aus den Einzelerträgen der jeweils 176 geernteten Pflanzen gemittelt. Der Ertrag pro Hektar wurde anschließend aus dem idealen, theoretischen Ist – Pflanzenbestand abgeleitet. Dazu wurde der Flächenanspruch jeder Pflanze, also $0,75 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 0,225 \text{ m}^2$ berechnet und daraus der theoretische Bestand abgeleitet ($10\,000 \text{ m}^2 / 0,225 \text{ m}^2 = 44444$ Pflanzen). Die Berechnung des Hektarertrages erfolgte durch Multiplikation des idealen Pflanzenbestandes mit dem gemessenen Einzelpflanzenenertrag

4. Ergebnisse

4.1 Luft- und Bodentemperaturen in beiden Systemen

Zur Erläuterung der Temperaturunterschiede auf den Hochbeeten und im konventionellen System werden die Lufttemperaturen nach Beginn der ersten Vegetationszeit (für Dezember, Januar, Februar) und für den Monat Dezember exemplarisch dargestellt. Anschließend wird der Tagesverlauf der Bodentemperaturen gezeigt. Zum Abschluß wird Verlauf der Bodentemperaturen während der gesamten Vegetationszeit 1 (von Oktober bis März) und zu Beginn von Vegetationszeit 2 (von Oktober bis Dezember) beschrieben.

Während der Vegetationszeit von Oktober bis April treten häufig Fröste auf, die vollständigen Ernteaussfall verursachen können. Die kleinräumigen Luft- und Bodentemperaturen der Hochbeete spielen deshalb eine wichtige Rolle, da sie zur Milderung dieser Fröste beitragen

4.1.1 Lufttemperaturen

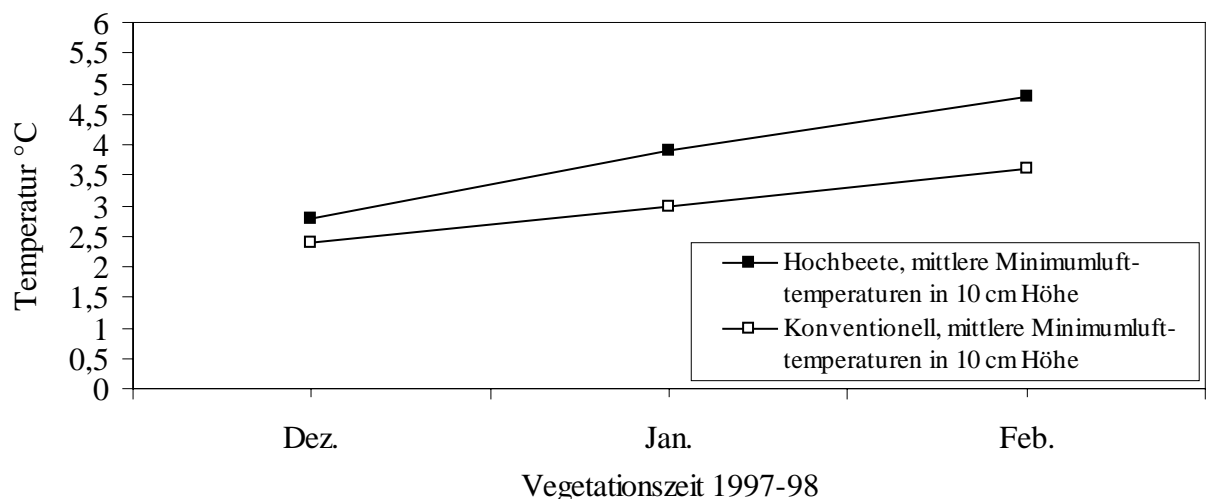


Abb. 1: Mittlere monatliche Minimumlufttemperaturen (gemittelt aus täglichen Minimumlufttemperaturen) in 10 cm Höhe während der ersten Vegetationszeit 1997 / 98 in Hochbeeten H (Standort Mitte) und im konventionellen System K

Der Hauptteil der Grünmasse der Kartoffeln befand sich im Untersuchungszeitraum in 10 cm Höhe. Die Hochbeete wiesen durchgängig höhere mittlere Minimumtemperaturen in 10 cm Höhe auf. Die Temperatursteigerung der Minimumtemperaturen im Zeitverlauf war in den Hochbeeten etwas stärker. Die erste Messung der Minimumlufttemperaturen fiel zeitlich in die phänologische Phase der ersten Blüte (etwa Mitte Dezember) und der anschließenden Stolonenbildung (Ende Dezember). Im Januar folgte die zweite Blüte mit beginnender Knollenbildung (2. Messung), die Anfang Februar von einer dritten Blüte unterbrochen wurde (3. Messung). Die Knollenbildung setzte sich danach fort (VARGAS et al. 1998, S.56). Genau in dieser Phase der oberirdischen Grünmassebildung zeigten die Hochbeete günstigere Lufttemperaturen für die Pflanzen, speziell bei auftretenden Frösten (Abb. 2).

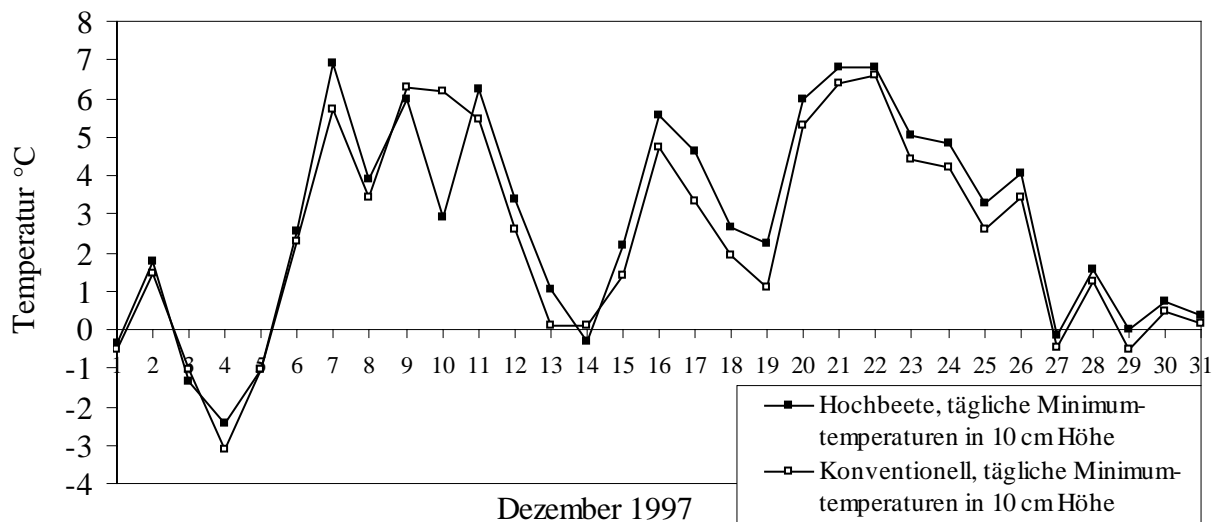


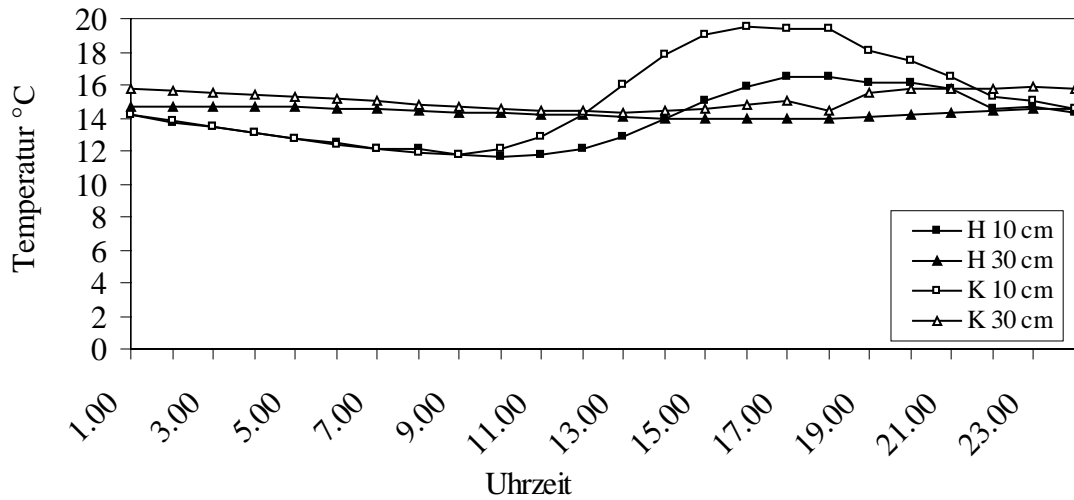
Abb. 2: Tägliche Minimumlufttemperaturen in 10 cm Höhe im Dezember 1997 in beiden Systemen (Hochbeet: mittlerer Standort)

Im Dezember zeigten die Hochbeete meist höhere tägliche Minimumlufttemperaturen als das konventionelle System (Ausnahmen 9.12 bis 11.12. und 14.12). Vor allem zu Beginn (04.12.) bei stärkerem Frost ($-2,5\text{ °C}$ auf den Hochbeeten und $-3,1\text{ °C}$ im konventionellen System, Differenz $0,6\text{ °C}$) und am Ende des Monats (28. und 30.12) waren die Minimumlufttemperaturen auf den Hochbeeten höher als auf den konventionellen Feldern. Am 28. und 30.12 blieben die Temperaturen auf den Hochbeeten im positiven Bereich, während sie auf den konventionellen Feldern zu diesem Datum unter 0 °C fielen.

4.1.2 Bodentemperaturen im Tagesverlauf

Die Bodentemperaturen im Tagesverlauf wurden gegen Ende der ersten Vegetationszeit (9. bis 15.3.98) gemessen. Zu diesem Zeitpunkt werden die Tag / Nacht Schwankungen der Lufttemperaturen (Maxima und Minima) durch den Übergang zur Trockenzeit (April bis September) bereits wieder größer, so daß verstärkt mit dem Auftreten von Bodenfrost zu rechnen ist. Durch die Messungen sollte überprüft werden, inwieweit diese zunehmenden Lufttemperaturunterschiede die Hochbeete und die konventionellen Felder in 2 cm und 10 cm Bodentiefe im Tagesverlauf beeinflussen, bzw. in welchem System diese Unterschiede besser abgepuffert werden.

a)



b)

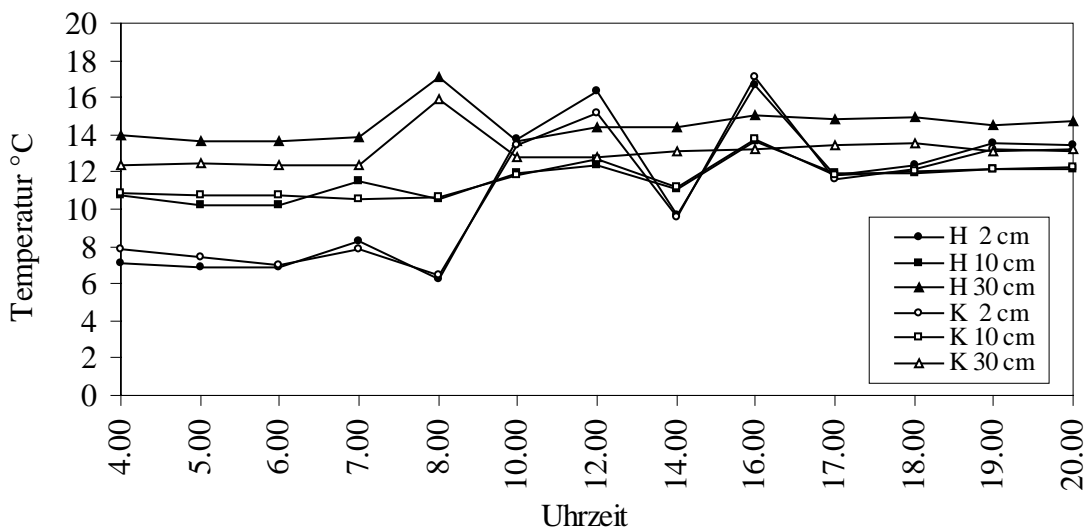


Abb. 3: Mittlerer Tagestemperaturverlauf (stündliche Mittelwerte von 6 Tagen) im Boden von Hochbeeten (Standort Mitte) und konventionellen Feldern a) automatische Messungen in zwei Bodentiefen b) eigene Messungen in drei Bodentiefen

Die Abbildungen zeigen den Verlauf der mittleren Tagestemperaturen (siehe auch 3.3.2) in zwei, bzw. drei Bodentiefen gegen Ende der ersten Vegetationszeit, vom 9. bis zum 15.3.98. Bei dem Vergleich beider Messungen ist zu beachten, daß die Zeitachsen beider Abbildungen stündlich nicht übereinstimmend dargestellt sind.

Der Temperaturverlauf eines Tages war in beiden Systemen in den drei Bodentiefen ähnlich (Abb. 3 a und b). Die Temperaturen waren im Tagesgang in 30 cm Tiefe am höchsten, in 2 cm am niedrigsten. In 10 cm Tiefe war der Tagesgang ausgeglichener und folgte auf

niedrigerem Niveau dem Verlauf in 2 cm Tiefe. Die größten Temperaturschwankungen traten nahe der Bodenoberfläche in 2 cm Tiefe auf (Abb. 3 b).

Deutliche Unterschiede in 30 cm Tiefe zeigten sich bei den eigenen Messungen (Abb. 3 b), in durchgängig 1 bis 2 °C höheren Temperaturen in den Hochbeeten als in den konventionellen Feldern. Bei den Messungen der Thermosonden (Abb. 3 a), zeigten die konventionellen Felder in 30 cm Tiefe höhere Temperaturen während des Tagesverlaufs. Sie kühlten nachts nicht so stark aus.

Mit den eigenen Messungen (Abb. 3 b) wurden in 10 cm Tiefe im konventionellen System bis 6.00 Uhr höhere Temperaturen als in den Hochbeeten gemessen. Bei den Messungen der Thermosonden (Abb. 3 a) zeigten die Hochbeete von 5.00 bis 8.00 Uhr morgens in 10 cm Bodentiefe mit 12,78; 12,47; 12,2; 12,2 °C höhere Temperaturen als das konventionelle System mit 12,69; 12,37; 12,1; 11,9; 11,78 °C (Unterschiede: 0,09; 0,1; 0,1; 0,3 °C).

Gegen 12.00 und 16.00 Uhr stiegen die Temperaturen in 2 cm Tiefe über die in 30 cm Tiefe an. Um 12.00 zeigten die Hochbeete höhere Temperaturen in 2 cm Tiefe, um 16.00 Uhr die konventionellen Felder. Die Maximalwerte der Temperaturen an der Bodenoberfläche (2 cm Bodentiefe) waren so hoch wie die Temperaturen, die von den Hochbeeten bereits um 8.00 Uhr in 30 cm Tiefe erreicht wurden.

In der übrigen Zeit waren die Temperaturen in 10 cm Bodentiefe bei den konventionellen Feldern höher und stiegen ab 9.00 Uhr morgens stärker an als auf den Hochbeeten.

Erst gegen Mittag (konv. 12.00 Uhr, Hochbeete 15.00 Uhr) wurde es in 10 cm Bodentiefe wärmer als in 30 cm Tiefe, und zwar deutlich stärker bei den konventionell bewirtschafteten Feldern.

4.1.3 Bodentemperaturverlauf während der Vegetationszeit

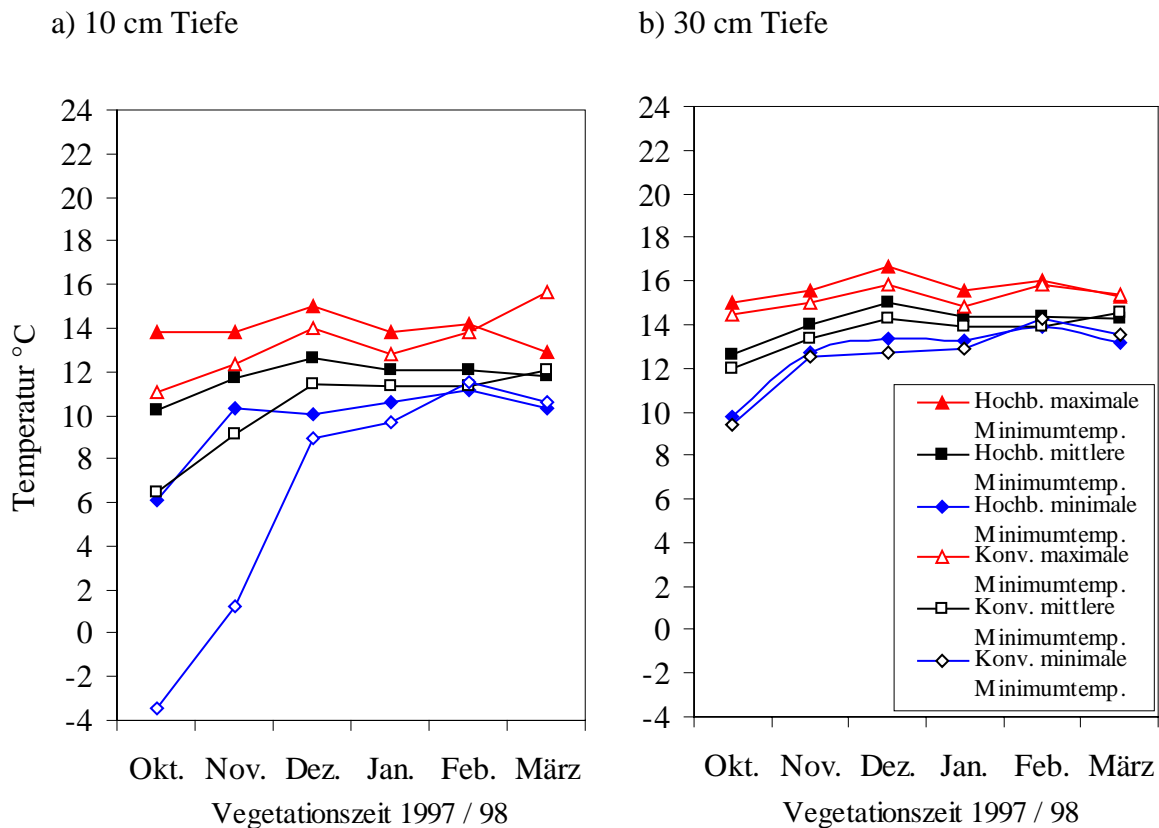


Abb. 4: Mittlere monatliche Minimumtemperaturen (M), gemittelt aus Minimumtagestemperaturen, und deren Schwankungsbreite (Min, Max) in beiden Systemen (Hochbeete: H, konventionell: K) in zwei Bodentiefen (10 und 30 cm) während der Vegetationszeit 1997 / 1998

Die Abbildung 4 zeigt für jeden Monat der ersten Vegetationszeit die mittleren Minimumtemperaturen in 10 und 30 cm Bodentiefe und deren Schwankungsbreite, d.h. die jeweils höchste (rot dargestellt) und niedrigste (blau dargestellt) gemessene Temperatur des Monats. Die Meßtiefen von 10 und 30 cm wurden gewählt, weil das Wurzelsystem konventioneller Kartoffelarten (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigena*) Tiefen bis 35 cm erreicht. Wurzeln der Bitterkartoffel erreichen Tiefen bis 50 cm (VACHER et al. 1992). In größeren Tiefen (> 50 cm) wirken sich Tagesschwankungen nicht mehr aus (ILACO 1981, S. 16). Die Knollen wurden etwa 10 bis 15 cm tief gelegt. Gemeinsam war beiden Systemen, daß in 10 cm Bodentiefe die Temperaturen stärker variierten und daß sich die Schwankungsbreite mit fortschreitender Vegetationsperiode verringerte. Auch die Amplitude der Temperaturschwankung in 30 cm Tiefe verlief während der Vegetationszeit ähnlich. Ein Unterschied zwischen Hochbeeten und konventionellem Anbau bestand darin, daß die maximalen, mittleren und minimalen Minimumtemperaturen in beiden Bodentiefen in den Hochbeeten höher waren als in den konventionellen Feldern (Ausnahme März). Auch die Extremtemperaturen sanken in 30 cm nicht so tief ab wie im konventionellen System.

In 10 cm Tiefe sank die minimale Minimumtemperatur auf den Hochbeeten nicht so tief wie in den konventionellen Feldern. Sie fiel während der gesamten Vegetationszeit nicht unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, während im konventionellen System Fröste auftraten (Oktober $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ein weiterer Unterschied zwischen den Systemen bestand zu Vegetationsbeginn in der ausgeglicheneren Amplitude der Minimumtemperaturen bei den Hochbeeten. Die Temperaturschwankungen zwischen den Extremwerten der Minimumtemperaturen (Minima und Maxima) war in den konventionellen Feldern im Oktober, November und Dezember in 10 cm Bodentiefe größer (Abb. 4 a) als in den Hochbeeten.

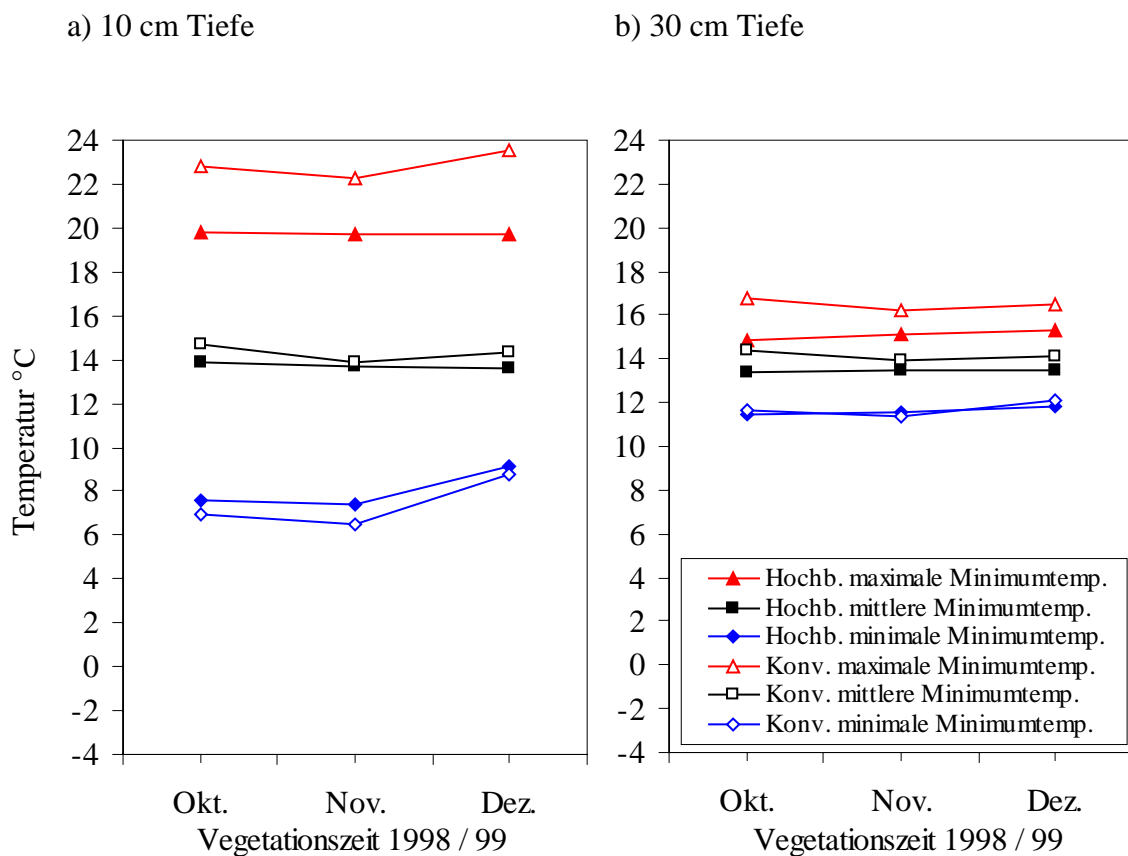


Abb. 5: Mittlere monatliche Minimumtemperaturen (M), gemittelt aus Minimumtagestemperaturen, und deren Schwankungsbreite (Min, Max) in beiden Systemen (Hochbeete: H, konventionell: K) in zwei Bodentiefen (10 und 30 cm) zu Beginn der zweiten Vegetationszeit 1998 / 99

In Abb. 5 werden die zu Beginn der zweiten Vegetationszeit 1998 / 99 (Oktober, November und Dezember) gemessenen Temperaturen dargestellt. Ähnlich wie in der ersten Vegetationszeit waren die minimalen Minimumtemperaturen in 10 cm Tiefe bei den Hochbeeten höher (Differenz: Okt. $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, Nov. $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, Dez. $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Im Gegensatz zu der ersten Vegetationsperiode zeigten zu Beginn der zweiten Vegetationszeit die konventionellen Felder in 10 und 30 cm Tiefe eine höhere mittlere und maximale Minimumtemperatur. Die Unterschiede zwischen den Systemen betragen bei den mittleren

Minimumtemperaturen in 10 cm Bodentiefe: 0,8; 0,2 und 0,7 °C, in 30 cm Tiefe 1; 0,4 und 0,6 °C zugunsten der konventionellen Felder (Abb. 5 a, b).

Weitere Unterschiede im Vergleich zur ersten Vegetationszeit waren die größeren Schwankungen in beiden Systemen. Im Dezember 1998 beispielsweise wichen die Extremwerte um ± 6 °C ab, im Jahr davor nur um ± 4 °C. Die Maximalwerte waren in beiden Tiefen deutlich höher und die niedrigste gemessene Temperatur sank nicht so tief ab. Die Hochbeete zeigten eine geringere und ausgeglichene Temperaturamplitude.

Die Maxima der Minimumtemperaturen wurden in der zweiten Vegetationszeit in beiden Systemen in 10 cm Bodentiefe erreicht, d.h. der Boden erwärmte sich stärker in 10 cm Tiefe. Während der gesamten ersten Vegetationszeit lagen die Maxima in 30 cm Bodentiefe.

4.1.4 Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse

Die Luftminimumtemperaturen in 10 cm Höhe waren im Dezember, Januar und Februar und täglich während eines gesamten Monats (Dezember) in der ersten Vegetationszeit 1997 / 98, im außergewöhnlichen Anbaujahr, höher auf den Hochbeeten (Abb. 1). Bei einem am 05.12.97 gemessenen Frostereignis (Hochbeete $-2,5$ °C, konventionell $-3,1$ °C) lagen die Minimumlufttemperaturen auf den Hochbeeten um 0,6 °C höher als im konventionellen Anbausystem (Abb.2).

Im Tagesverlauf waren die mittleren Bodentemperaturen auf den konventionell bewirtschafteten Feldern in beiden Bodentiefen höher (Abb. 3 a). Im kritischen Zeitraum zwischen 5.00 und 8.00 Uhr morgens, in dem es vorwiegend zu Frösten kommt, waren die Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe in den Hochbeeten um 0,1 bis 0,3 °C höher.

Während des außergewöhnlichen Anbaujahres 1997/98 zeigten die Hochbeete im Vegetationsverlauf Vorteile, weil die mittleren Minimumtemperaturen und die Maxima in beiden Bodentiefen (10 und 30 cm) höher waren als im konventionellen System. Auch sanken die absoluten Minimumtemperaturen nicht so tief ab wie im konventionellen System (Abb. 4). Die Differenzen zugunsten der Hochbeete betragen im Okt. 9,5 °C, im Nov. 9,1 °C und im Dez. 1,2 °C. Deswegen kam es bei den konventionellen Feldern zu Beginn der Vegetationszeit zu Frösten, während die Temperaturen in den Böden der Hochbeete im positiven Bereich blieben.

In klimatisch durchschnittlichen Jahren, z.B. 1998 / 99, wurden in den konventionell bewirtschafteten Feldern in beiden Tiefen höhere mittlere und maximale Minimumtemperaturen im Vegetationsverlauf gemessen (Abb. 5), die minimalen Minimumtemperaturen lagen jedoch in 10 cm Tiefe in den Hochbeeten über denen des konventionellen Systems (Differenz: Okt. 0,6 °C, Nov. 0,9 °C, Dez. 0,4 °C).

Die maximalen Minimumtemperaturen wurden in der zweiten Vegetationszeit in 10 cm Tiefe gemessen, in der ersten hingegen in 30 cm Tiefe.

In beiden Jahren waren die Temperaturschwankungen in 10 cm Tiefe bei den Hochbeeten geringer.

4.2 Bodenfeuchte während der Vegetationszeit in Hochbeeten und konventionellen Feldern

Da es während der Vegetationszeit häufig zu Dürreperioden kommt, spielt die Wasserverfügbarkeit für die landwirtschaftliche Produktion eine wichtige Rolle. Die Hochbeete unterschieden sich hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit deutlich von den konventionell bewirtschafteten Feldern. Die konventionellen Felder waren ausschließlich auf die Niederschläge während der Vegetationszeit (Oktober bis April) angewiesen (Regenfeldbau). Bei den Hochbeeten kam als weiterer Input das Bewässerungswasser der Kanäle hinzu. Diese führten während der gesamten Vegetationszeit Wasser. Die Mindestwassertiefe von 80 cm stieg nach intensiven Niederschlägen jeweils kurzfristig an. Bewässert wurde vom Beginn bis zum Ende der Vegetationszeit, die Menge des Bewässerungswassers wurde nicht erfaßt. In beiden Systemen stand das Grundwasser während der Vegetationszeit hoch an (95 cm unter GOF). Im Folgenden wird die zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte und die Bodenwasserbewegung in Hochbeeten und konventionellen Feldern während der Vegetationszeit 1997 / 98 dargestellt.

4.2.1 Verlauf der Bodenfeuchte

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen den Verlauf der Bodenwasserspannungen (Tensionen) an drei Hochbeetstandorten (Nordende Hochbeet 8, Südende Hochbeet 8, Nordende Hochbeet 4) jeweils am östlichen Rand, in der Mitte und am westlichen Rand, sowie im konventionellen Landnutzungssystem an zwei Standorten. Dargestellt werden die Niederschläge (Regen) ab Dezember und die davon beeinflussten Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse während der Vegetationszeit 1997 / 1998 von Dezember bis April.

Die Darstellung des per Definition negativen Matrixpotentials erfolgt nachfolgend, ohne Berücksichtigung des negativen Vorzeichens, als Zahlenwert allein unter dem Begriff Wasserspannung (vgl. 3.2). Bei vollständiger Bodenwassersättigung nimmt die Wasserspannung den Wert 0 an. Sinkt sie weiter ab (negative Werte), weist dieses auf freies Wasser hin, das versickern kann. Mit abnehmendem Wassergehalt steigt die Wasserspannung an. Tensionen zwischen 90 hPa und 800 hPa (Bereich der nutzbaren Feldkapazität (nFK) und obere Meßgrenze der Tensiometer), zeigen pflanzenverfügbares Bodenwasser an. Werte über 800 hPa wurden in beiden Systemen nicht erreicht, d.h. das Wasser war während der gesamten Vegetationszeit in beiden Systemen pflanzenverfügbar. Die Meßtiefen lagen bei 15 und 25 cm Tiefe um den oberflächennahen Wasserfluß beurteilen zu können.

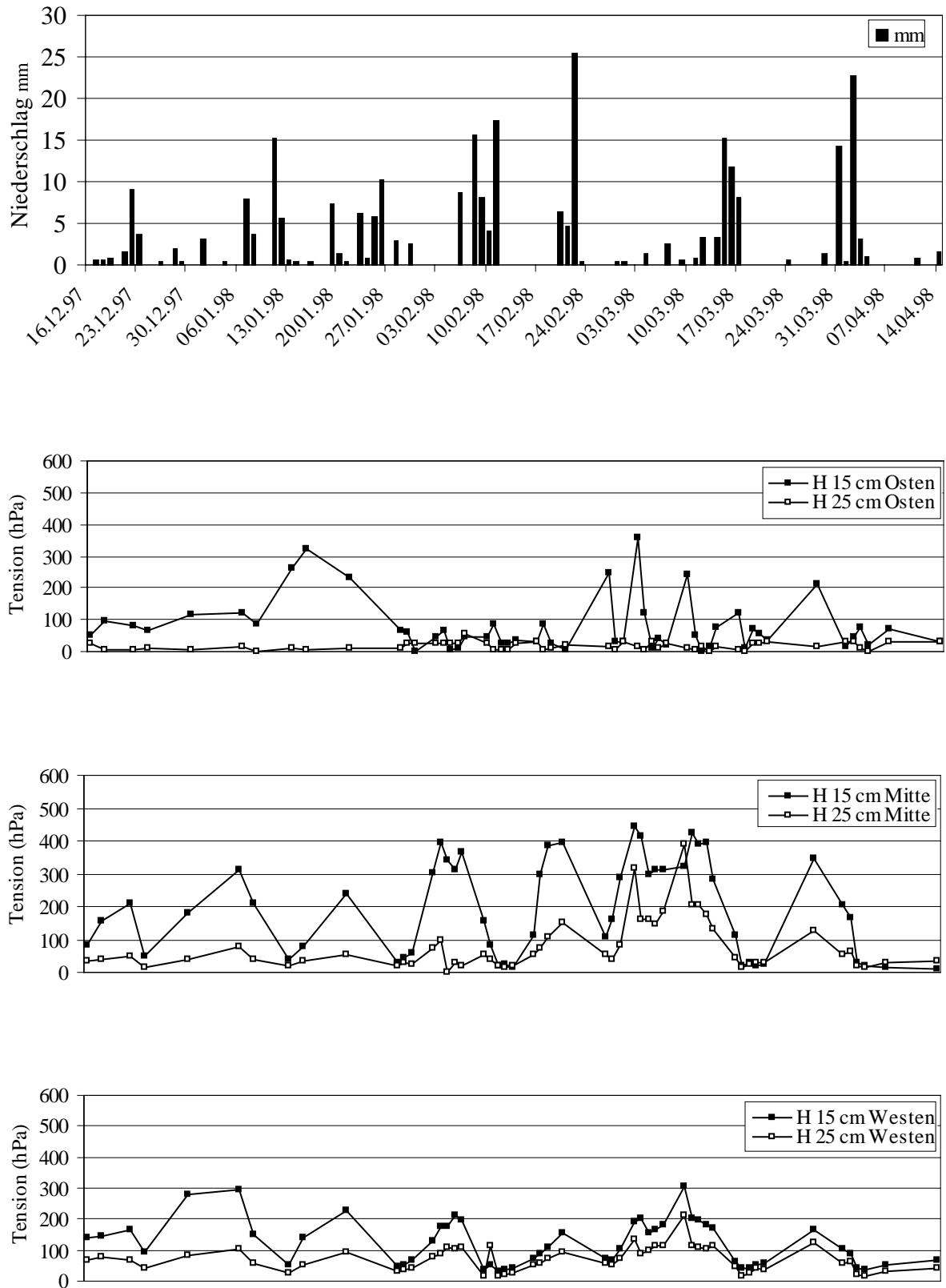


Abb. 6: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 8 (Nordende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

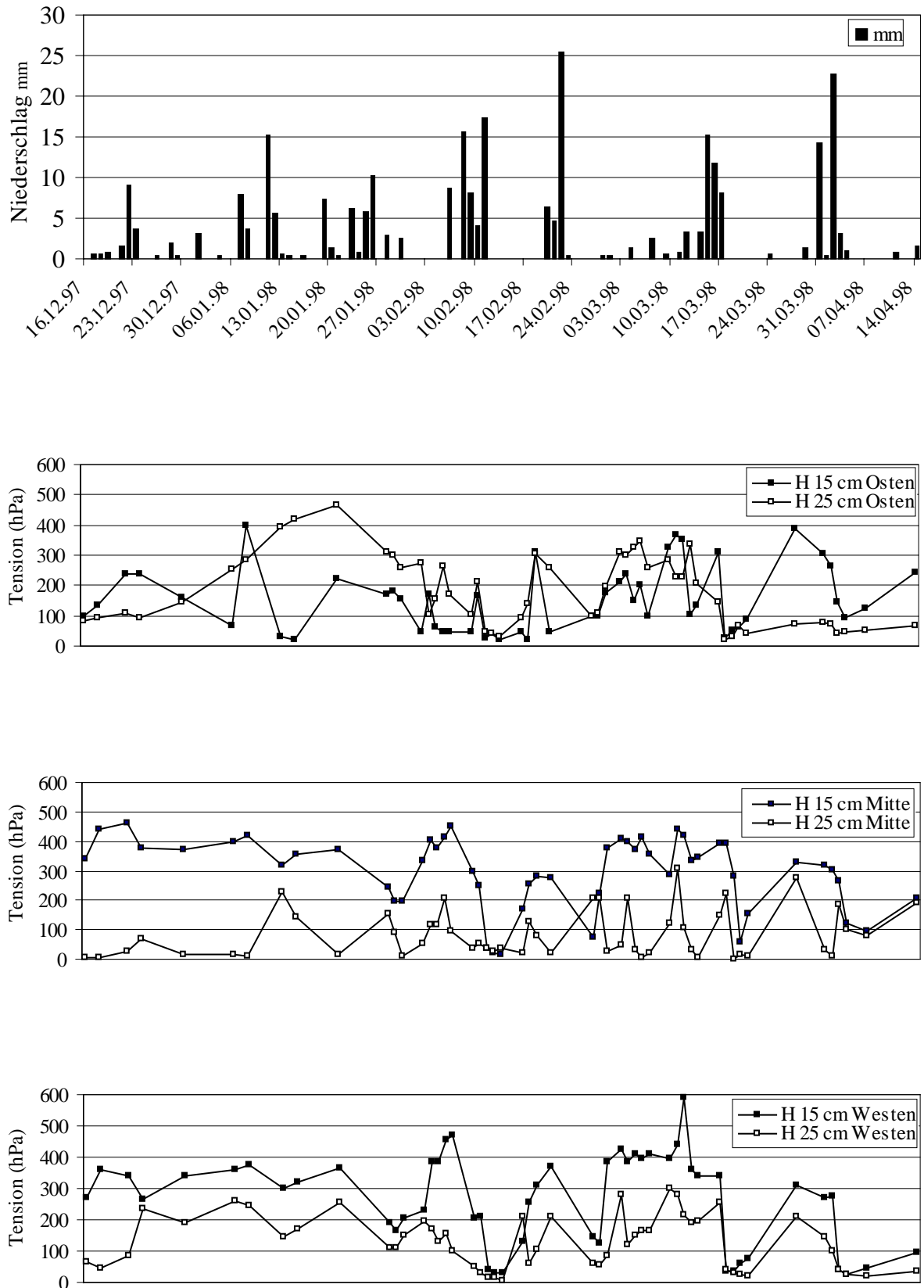


Abb. 7: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 8 (Südende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

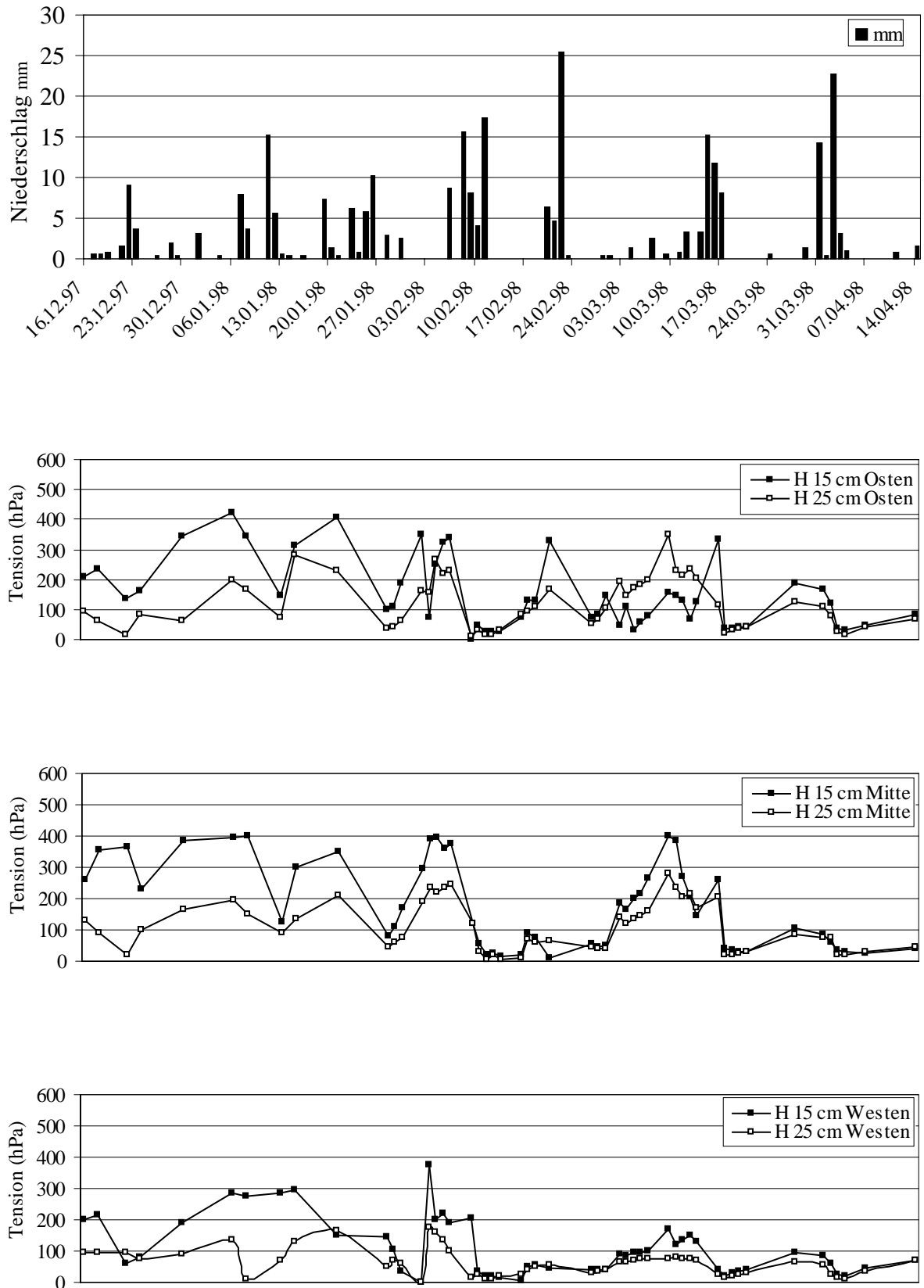


Abb. 8: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe an drei Standorten (Ostseite, Mitte und Westseite) auf Hochbeet 4 (Nordende), während der Vegetationszeit 1997 / 98

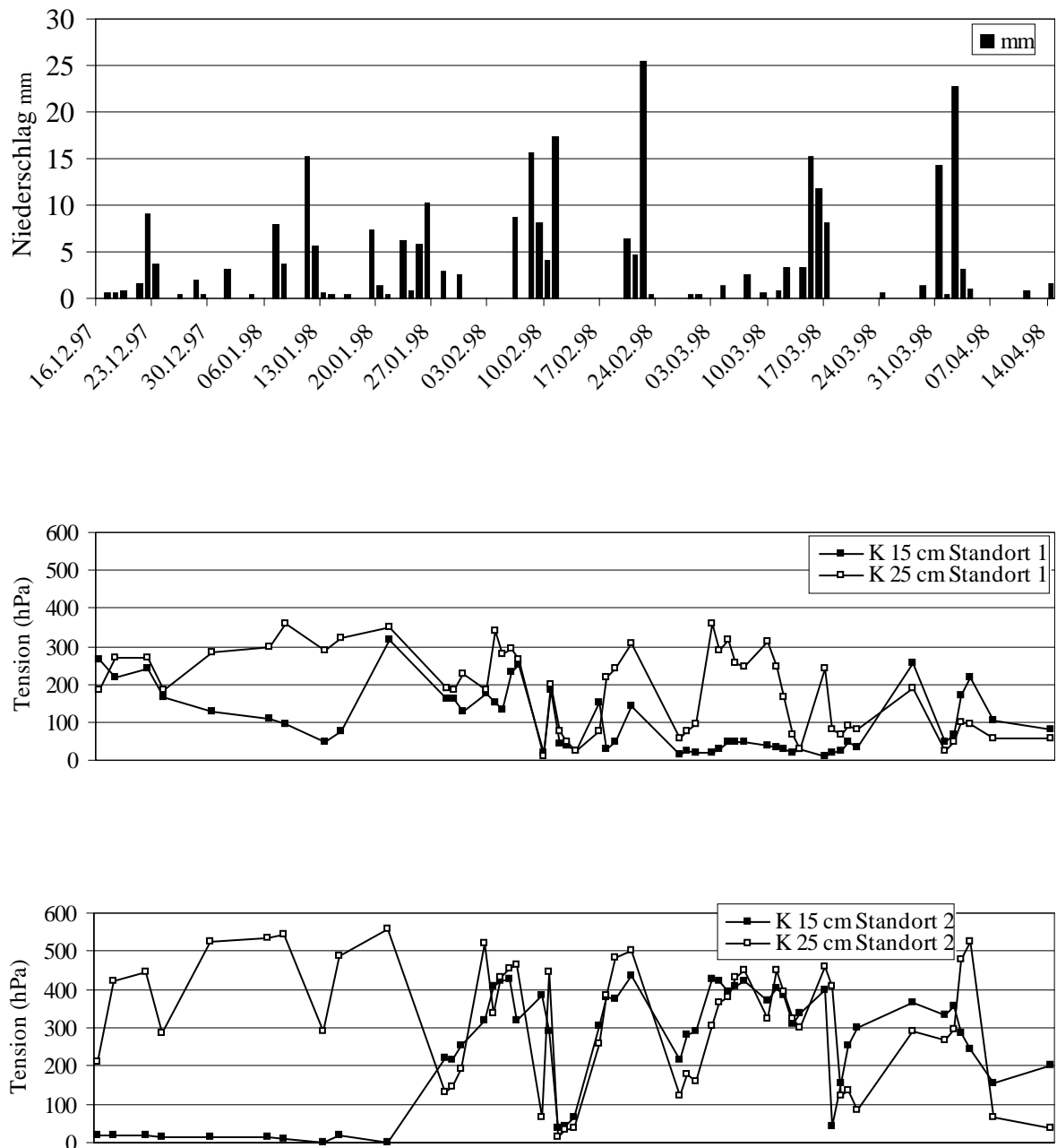


Abb. 9: Niederschlagsverteilung und Entwicklung der Bodenwasserspannung (Einzelwerte) in 15 cm und 25 cm Tiefe auf konventionell bewirtschafteten Feldern an 2 Standorten, während der Vegetationszeit 1997 / 98

Die Zeitachsen der Tensionsgrafiken entsprechen derjenigen der Niederschlagsdarstellung. Gemeinsam war beiden Systemen (Abb. 6 bis 9), daß die Vegetationszeit deutlich in zwei Zeitabschnitte eingeteilt werden konnte. Im ersten Drittel bis zum 01.02. waren die Verläufe der Bodenwasserspannung relativ ausgeglichen. Die Bodenfeuchte zwischen den Tiefen (15 cm und 25 cm) unterschied sich deutlich. Ab Anfang Februar schwankte der Verlauf der Wasserspannung, und damit die Bodenfeuchtigkeit stark in beiden Tiefen, und die

Tensionsunterschiede zwischen den beiden Tiefen nahmen teilweise ab: in Hochbeet 4 (Abb. 8) in der Mitte sowie am westlichen Rand, am Nordende in Hochbeet 8 (Abb. 6) am westlichen Rand und auf den konventionellen Feldern (Abb. 9) an Standort 2.

Der deutlichste Unterschied zwischen Hochbeeten und konventionellen Feldern zeigte sich bei einem Vergleich der Feuchte in den Bodentiefen. Während in den Hochbeeten fast ausnahmslos die Wasserspannungen im Oberboden (15 cm) höher als im Unterboden (25 cm) waren, verhielt es sich bei den konventionell bearbeiteten Feldern genau andersherum.

Die Wirkung der Niederschläge auf die Bodenfeuchte läßt sich in beiden Systemen erkennen, siehe beispielsweise das Niederschlagsereignis vom 22.12.1997 mit 9,1 mm. Es führte zu einem deutlichen Absinken der Tensionen (Hochbeet 8, Nordende, mittlerer Standort, Abb. 6) und im konventionellen System an Standort 2 (Abb. 9). Dabei war die Abnahme der Bodenwasserspannung, d.h. die Zunahme des Bodenwassergehaltes auf dem konventionellen Feld in 25 cm Bodentiefe, auf den Hochbeeten in 15 cm höher. Abnehmende Bodenfeuchtegehalte (Anstieg der Tensionen) nach einer niederschlagsarmen Periode (0,3 mm Regen) vom 02. bis zum 06.01.98 waren ebenso deutlich zu erkennen (Abb. 6 und 7, mittlere Standorte). Nach Niederschlägen am 11.02.98 in Höhe von 17,3 mm waren in beiden Systemen sowohl im Ober- als auch im Unterboden erneute Zunahmen des Bodenwassergehaltes zu erkennen in beiden Tiefen bei den Hochbeeten (Abb. 6 - 9) und den konventionellen Feldern (Abb. 9). Die Tensionen waren negativ, die Böden vollständig wassergesättigt.

Auf den konventionellen Feldern spiegelten sich die Niederschläge im ersten Drittel der Vegetationszeit in der wechselnden Bodenfeuchte deutlicher wider als bei den Hochbeeten. So gab es im ersten Drittel der Regenzeit (16.12.97 bis 30.01.98) eine Ausnahme, d.h. die Niederschläge wurden nicht sofort in der Bodenwasserspannung widergespiegelt, auf den konventionellen Feldern. Kurze Trockenzeiten mit 0 mm Niederschlag (24., 25.12.97; 2., 3.1.; 5., 6.1. und 17., 18.1.98) bewirkten keine Abnahme der Bodenfeuchte. Die hohe Wassersättigung verblieb in 15 cm Tiefe (Standort 2) durch hoch anstehendes Grundwasser auf gleichem Niveau. Bei den Hochbeeten gab es häufige Ausnahmen durch die Bewässerungskanäle. So nahm z. B. nach dem Niederschlag am 22.12.97 mit 9,1 mm die Bodenfeuchtigkeit ab (Abb. 7). Der Boden wurde trotz Regen in 25 cm in der Mitte und am westlichen Rand trockener. Nur am östlichen Rand stieg die Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe an. Der Niederschlag am 13.01.98 mit 15 mm bewirkte auf der Ostseite, Abb. 6, erst ein um 2 - 3 Tage verzögertes Ansteigen der Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe. Trotz dieses Niederschlages nahm die Bodenfeuchte am östlichen Rand in 25 cm Tiefe, in der Mitte in 15 cm Tiefe und am westlichen Rand in beiden Tiefen ab. Am 27.01.98 sank die Bodenfeuchte ungeachtet des vorangegangenen Niederschlages. Lediglich in der Mitte vom Hochbeet 8 in 25 cm Tiefe nahm die Wasserspannung zu (Abb. 7). Die kurze Trockenperiode am 06.02. bewirkte keine Abnahme des Bodenwassergehaltes. In 15 cm Tiefe am östlichen Rand nahm die Bodenfeuchte jedoch zu, ebenso in 25 cm Tiefe am westlichen Rand. Der Niederschlag am 23.02.98, mit 25 mm der höchste während der Vegetationszeit, führte auf den konventionellen

Feldern zu einer Zunahme der Bodenfeuchtigkeit. Auf den Hochbeeten nahmen die Wasserspannungen jedoch weiterhin zu, mit Ausnahme der Standorte auf Hochbeet 8 am östlichen Rand in 15 cm und in der Mitte in 25 cm Tiefe (Abb. 7).

Auffällig bei den Hochbeeten war der im ersten Drittel gleichbleibend wassergesättigte Boden in 25 cm Tiefe am östlichen Rand, in der Mitte und am westlichen Rand des Hochbeets (Abb. 6). In dieser Reihenfolge nahm die Bodenfeuchte auch ab. Am östlichen Rand wurde Bodenwassersättigung erreicht. Am westlichen Rand war die Bodenfeuchte trotz angrenzendem Bewässerungskanal niedriger als am östlichen Rand. Dieser Standort des Hochbeetes war ab 12.00 Uhr intensiver Strahlung ausgesetzt. Ebenso auffällig waren im ersten Drittel, zwischen dem 23.12.97 und dem 06.01.98, die sehr deutlichen Feuchtigkeitsunterschiede zwischen den beiden Tiefen in der Mitte des Hochbeetes Nr. 8 (Abb. 7).

4.2.2 Wasserbewegung im Boden

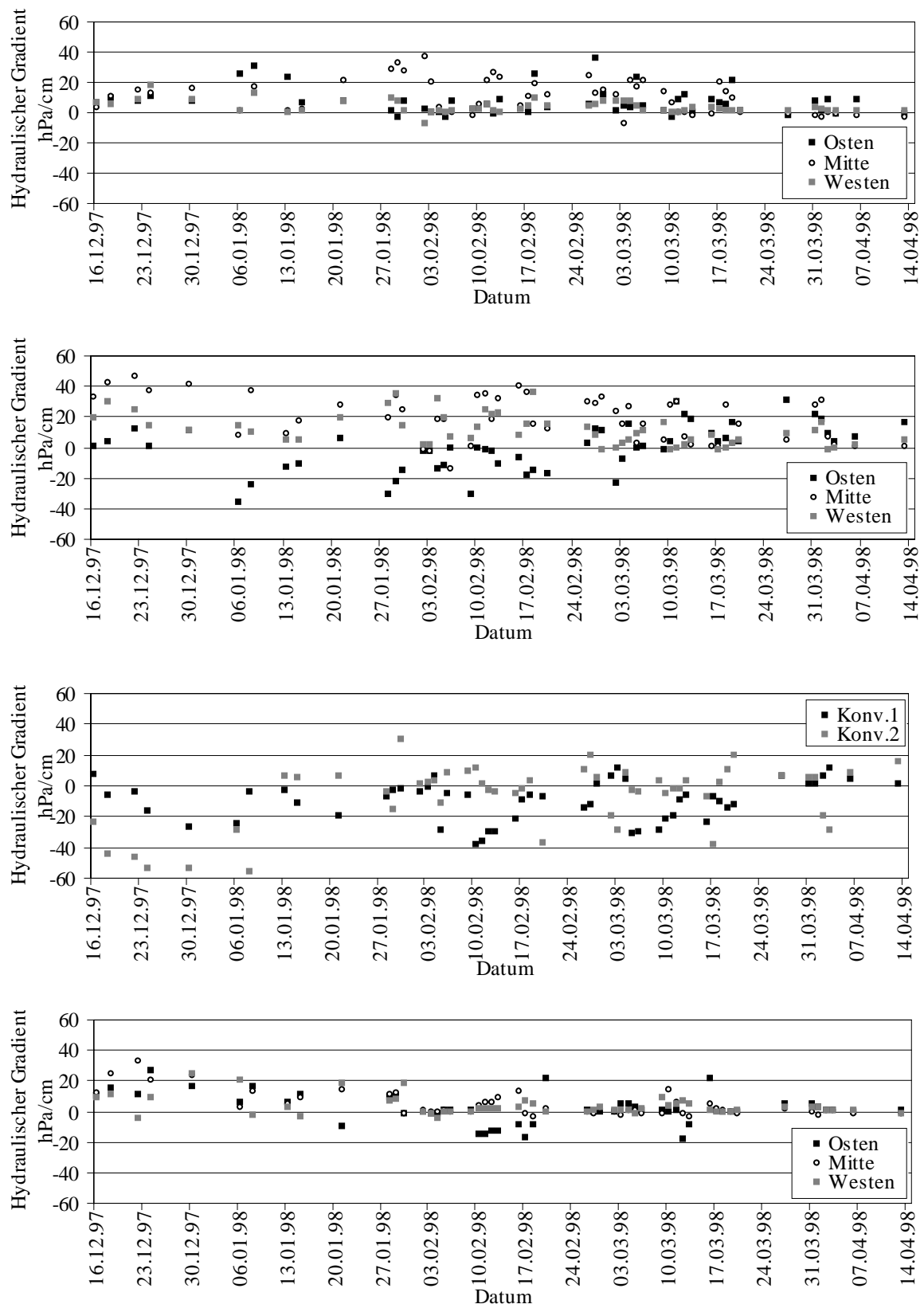


Abb. 10: Hydraulischer Gradient (hPa / cm) während der Vegetationszeit in 20 cm Bodentiefe der Hochbeete 8 (Nord-, Südende) und 4 (Nordende) sowie im konventionellen System (von oben nach unten)

In Abbildung 10 werden die hydraulischen Gradienten zwischen 15 und 25 cm Bodentiefe für drei Hochbeetstandorte (Hochbeet 8 am Nord- und am Südende und Hochbeet 4 am Nordende) sowie für zwei Standorte auf den konventionellen Feldern dargestellt. Die hydraulischen Gradienten zeigen die Richtung der Bodenwasserbewegung zwischen 15 bis 25 cm Tiefe an (siehe 3.2). Der Gradient gilt für die Bodentiefe 20 cm. Die Bodenwasserbewegung erfolgt vom größeren zum kleineren hydraulischen Potential, d.h. bei positivem Gradienten erfolgt eine aufwärts gerichtete, bei negativem eine abwärts gerichtete Bodenwasserbewegung (AHL et al. 1992, S.179ff.).

Bei den konventionellen Feldern war die Bodenwasserbewegung während der Vegetationszeit vorwiegend nach unten gerichtet, erkennbar an den hydraulischen Gradienten, die sich im negativen Bereich befanden (Abb. 10 unten). Bei den Hochbeeten, (Abb. 10 oben) erfolgte hauptsächlich kapillarer Aufstieg, ableitbar aus den im positiven Bereich liegenden hydraulischen Gradienten.

Bei beiden Systemen trat im zweiten Zeitabschnitt jeweils auch die andere Richtung des Bodenwasserflusses auf. Vor allem am östlichen Rand von Hochbeet 8 (Südende) erfolgt eine nach unten gerichtete Wasserbewegung, während am westlichen Rand durchgehend kapillarer Aufstieg vorherrschte (Abb. 10).

Tab. 2: Schwankung (Variationskoeffizienten) des mittleren Bodenwassergehaltes in Hochbeeten (östlicher Rand, Mitte, westlicher Rand) und im konventionellen Anbausystem (2 Standorte) in zwei Perioden der Vegetationszeit 1997 / 98 (16.12. bis 30.01., n = 13 (1) und 02.02. bis 14.04., n = 39 (2)); Variationskoeffizient berechnet aus: (Standardabweichung / Mittelwert)*100

	Periode	Variationskoeffizient (%)					
		Östlicher Rand		Mitte		westlicher Rand	
		15 cm	25 cm	15 cm	25 cm	15 cm	25 cm
Hochbeet 8 (Nordende)	1	78	64	71	46	58	39
	2	176	67	71	105	59	58
Hochbeet 8 (Südende)	1	61	54	25	179	24	47
	2	96	66	45	107	63	92
Hochbeet 4 (Nordende)	1	47	75	43	51	50	45
	2	86	72	92	80	91	75
Mittlere Zunahme der Variation von Periode 1 zu Periode 2 (%)		57	8	35	44	27	31
Konventionell (1)	1			48	25		
	2			165	69		
Konventionell (2)	1			204	45		
	2			37	53		
Mittlere Zunahme der Variation von Periode 1 zu Periode 2 (%)				117	26		

Die Variationskoeffizienten in Tab. 2 veranschaulichen die Stärke der Bodenfeuchteschwankungen in der Vegetationszeit 1997 / 98 und zeigen, daß diese im Vergleich der 1. (16. Dez. – 30. Jan.) zur 2. Periode (2. Feb. – 14. Apr.) in beiden Systemen merklich anstiegen. Auf den konventionell bewirtschafteten Feldern war mit durchschnittlich 117 % in 15 cm Bodentiefe die ausgeprägteste Zunahme zu verzeichnen. Auf den Hochbeeten nahm die Variation am östlichen Rand im Zeitverlauf um 57 % zu (15 cm Bodentiefe). Generell stiegen die Schwankungen in dieser Bodentiefe in den Hochbeeten vom westlichen zum östlichen Rand hin an. In der Mitte und am westlichen Rand der Hochbeete variierte die Bodenfeuchte in 25 cm stärker als in der oberen Bodenschicht.

Der deutlichste Unterschied zwischen den Systemen bestand in dem mit 117 % stärksten Anstieg der Schwankung der Bodenfeuchte bei den konventionellen Feldern am 1. Standort in 15 cm Tiefe. Bei den Hochbeeten war der Anstieg mit 57 %, 35 % und 27 % schwächer (Tab. 2).

4.2.3 Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse

Gemeinsam war beiden Systemen, daß sich die Vegetationszeit deutlich in zwei Zeitabschnitte gliedern ließ (Abb. 6 - 9). Vom Beginn der Vegetationszeit bis zum 01.02.1998

waren die Verläufe der Bodenwasserspannungen relativ ausgeglichen, zeigten jedoch zwischen beiden Bodentiefen (15 cm und 25 cm) deutliche Unterschiede. Im weiteren Verlauf der Vegetationszeit schwankte die Bodenfeuchtigkeit in beiden Tiefen stark, und die Unterschiede zwischen den beiden Bodentiefen verringerten sich erheblich.

Die Variationskoeffizienten für die Zunahme der Bodenfeuchteschwankungen im Verlauf der Vegetationszeit 1997 / 98 (Tab. 2) zeigten auf den konventionell bewirtschafteten Feldern mit 117 % in 15 cm Bodentiefe die stärkste Zunahme der Variation. Auf den Hochbeeten war der Anstieg mit 57 %, 35 % und 27 % schwächer ausgeprägt.

Die Bodenfeuchteverteilung in Ober- (15 cm Tiefe) und Unterboden (25 cm Tiefe) unterschied sich in den Systemen deutlich. Auf den drei Hochbeeten wurde jeweils an allen 9 Standorten (Abb. 6 - 8) in 25 cm Tiefe eine höhere Bodenfeuchtigkeit gemessen. Auf den konventionellen Feldern (Abb. 9) war die Bodenfeuchte während der Vegetationszeit in 15 cm Tiefe durchgängig höher als in 25 cm Tiefe.

Ein weiterer Unterschied zwischen Hochbeeten und konventionellen Feldern bestand in der Richtung der Bodenwasserbewegung. Bei den Hochbeeten erfolgte hauptsächlich kapillarer Aufstieg, während die Bodenwasserbewegung in den konventionell bewirtschafteten Feldern vorwiegend nach unten gerichtet war (Abb. 10).

In beiden Systemen trat gegen Ende der Vegetationszeit zeitweise eine jeweils entgegengesetzte Bodenwasserbewegung auf.

4.3 Bodennährstoffgehalte in Ober- und Unterböden der Systeme

Wie bei den Luft- und Bodentemperaturen und der Bodenfeuchte wurden auch Unterschiede im Bodennährstoffgehalt der beiden Systeme in Ober- und Unterboden vermutet.

4.3.1 Signifikante Unterschiede zwischen den Systemen (t - Test)

Um zu verdeutlichen, in welchen bodenchemischen Parametern sich die Hochbeete und das konventionelle System im Ober- und Unterboden zu den drei Zeitpunkten punktuell signifikant unterscheiden, wurde für jeden einzelnen Parameter getrennt nach Ober- und Unterboden ein t - Test durchgeführt. Die Signifikanzangaben beziehen sich auf das System und den Zeitpunkt.

Ein t - Test prüft, ob sich zwei unabhängige Stichproben hinsichtlich eines Merkmals signifikant unterscheiden. Verglichen werden dabei die Mittelwerte des Merkmals. Die Angabe eines Signifikanzniveaus mit einem Schwellenwert (signifikant ist $< 0,05$) gibt Auskunft darüber, ob geringe Unterschiede bei den Mittelwerten noch signifikant sind.

Es können keine Aussagen über signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden innerhalb eines Systems gemacht werden. Auch über die Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitpunkten können keine Signifikanzangaben gemacht werden.

Tab. 3: Signifikante Unterschiede (Mittelwerte, n = 8) der bodenchemischen Parameter zwischen konventioneller Landnutzung und traditionellen Hochbeeten im Ober- und Unterboden: zu Beginn und am Ende von Vegetationszeit 1 (Zeitpunkt Z 1 und Z 2) und zu Beginn von Vegetationszeit 2 (Zeitpunkt Z 3); (t-Test), signifikante Werte (< 0,05) durch Fettdruck hervorgehoben

Bodenchemische Parameter	Tiefe	Hoch-beete	Konv.	Hoch- Konv. beete		Hoch-beete	Konv.
		Z 1		Z 2		Z 3	
Mittelwerte, n = 8							
pH - Wert	0-20 cm	6,5	6,8	6,8	6,9	7,0	7,5
	20-40 cm	6,6	6,3	6,4	6,9	6,8	7,3
EL mS cm ⁻¹	0-20 cm	1,4	0,4	0,6	0,2	1,1	0,5
	20-40 cm	0,6	0,3	0,4	0,1	0,8	0,1
Ca ²⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	54,0	31,7	93,9	47,9	18,9	13,3
	20-40 cm	55,4	29,4	81,5	37,8	23,4	6,9
Mg ²⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	5,7	4,5	40,6	23,5	21,5	25,1
	20-40 cm	6,6	2,4	21,7	19,0	23,9	15,5
K ⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	0,5	0,3	1,8	1,5	1,7	1,2
	20-40 cm	0,5	0,3	1,5	1,3	2,8	3,6
Na ⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	1,0	0,5	3,8	5,1	5,1	4,3
	20-40 cm	0,6	0,4	4,2	3,6	4,4	2,6
ESP - Wert %	0-20 cm	1,6	1,4	2,7	6,5	10,8	9,7
	20-40 cm	1,0	1,2	3,9	5,8	8,1	9,1
N _{ges.} %	0-20 cm	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2
	20-40 cm	0,4	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2
org. Subst. %	0-20 cm	4,2	3,6	5,9	3,7	3,9	4,2
	20-40 cm	6,9	2,5	5,2	2,1	6,3	2,2
C _{org.} %	0-20 cm	2,4	2,0	3,4	2,2	2,3	2,4
	20-40 cm	4,0	1,5	3,0	1,2	3,6	1,3
P Olsen mg kg ⁻¹	0-20 cm	12,4	9,4	23,4	11,1	17,4	16,8
	20-40 cm	15,9	4,4	15,3	5,6	16,8	5,3

Der ESP – Wert wurde berechnet aus: (Summe der austauschbaren Na⁺ - Kationen / effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff.}), d.h. beim pH - Wert des Bodens gemessene KAK, * 100) FAO (1985). In diesem Fall wurde die KAK_{eff.} aus der Summe der basischen Kationen (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ und K⁺) gebildet.

Bei einem Vergleich der Systeme unterschied sich zu allen Zeitpunkten in beiden Bodentiefen die Höhe der elektrischen Leitfähigkeit EL. Sie war als einziger Parameter zu allen drei Zeitpunkten im Ober- und Unterboden der Hochbeete signifikant höher als im konventionellen System. Die Hochbeete zeigten signifikant höhere Konzentrationen an Stickstoff, org. Substanz, Phosphor und Calcium zu den drei Zeitpunkten im Unterboden. Zum Ende der ersten Vegetationszeit auch im Oberboden. In den Hochbeeten waren die Magnesiumkonzentrationen im Unterboden jeweils zu Beginn der Vegetationszeiten (Z 1 und Z 3) signifikant höher. K⁺ zeigte als einziger Parameter neben der elektrischen Leitfähigkeit, zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Z 1) in beiden Bodentiefen signifikant höhere Konzentrationen in den Hochbeeten. Hochbeete und konventioneller Anbau zeigten keine signifikanten Unterschiede beim pH - Wert und der Na⁺ - Konzentration.

Obwohl nicht signifikant, zeigte sich tendenziell, daß in den Hochbeeten höhere Nährstoffkonzentrationen im Unterboden als im Oberboden auftraten: Ca^{2+} , Mg^{2+} , N_{ges} und org. Substanz jeweils zum Beginn der Vegetationszeiten (Z 1 und Z 3), K^+ zu Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) und P Ols. zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Z 1). Bei der Nährstoffverteilung in den konventionellen Feldern traten stattdessen vorwiegend im Oberboden höhere Konzentrationen als im Unterboden auf: P Ols. und org. Substanz zu allen drei Zeitpunkten. Eine Ausnahme bildete Mg^{2+} .

Tab. 4: $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ Verhältnisse (berechnet aus Mittelwerten, $n = 8$) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und konventioneller Landnutzung zu drei Zeitpunkten

	Hochbeete	Konventionell	Hochbeete	Konventionell	Hochbeete	Konventionell
	Z 1		Z 2		Z 3	
0-20 cm						
$\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$	9,4 : 1	7 : 1	2,3 : 1	2 : 1	0,9 : 1	0,5 : 1
20-40 cm						
$\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$	8,3 : 1	12 : 1	3,8 : 1	2 : 1	1 : 1	0,4 : 1

Die Nährstoffverfügbarkeit im Boden wird durch Nährstoffantagonismen bestimmt, so nimmt die Mg^{2+} - Verfügbarkeit mit steigenden Ca^{2+} , ausgedrückt durch $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ Verhältnisse (austauschbare Kationen) $\geq 5 : 1$, stark ab. Bei Verhältnissen $< 3 : 1$ wird die P-Verfügbarkeit unterbunden, bei Verhältnissen $< 1:1$ die Ca^{2+} -Verfügbarkeit eingeschränkt. Optimale $\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$ Verhältnisse liegen für die meisten Nutzpflanzen bei 3 bis 4 : 1 (LANDON 1992, S.134).

4.3.1.1 Pflanzenverfügbare Nährstoffe

Die pflanzenverfügbaren Nährstoffe wurden nicht im t-Test erfaßt, weil sie nur zum zweiten Zeitpunkt erhoben wurden. Sie dienen deshalb als Ergänzung. Die Höhe der Konzentrationen der pflanzenverfügbaren Nährstoffe zu Beginn der zweiten Vegetationszeit bestätigte die durch den t-Test statistisch geprüften Systemunterschiede.

Tab. 5: Pflanzenverfügbare Nährstoffe (Mittelwerte, n = 8) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung zu Beginn der zweiten Vegetationszeit; Variationskoeffizient berechnet aus: (Standardabweichung / Mittelwert)*100

Tiefe		Hochbeete			Konventionell		
		Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
0-20 cm	Mittelwerte n = 8 mg kg ⁻¹	4510	120	235	1979	91	168
	Standardfehler	903	14	54	77	6	9
	Variations- koeffizient %	56	32	65	11	20	14
20-40 cm	Mittelwerte n = 8 mg kg ⁻¹	5097	113	153	1502	70	52
	Standardfehler	829	14	35	44	3	5
	Variations- koeffizient %	46	35	65	8	14	27

Die Konzentrationen an pflanzenverfügbaren Nährstoffen zu Beginn der zweiten Vegetationszeit waren im Oberboden und im Unterboden bei den Hochbeeten deutlich höher als im konventionellen System. Besonders deutlich war das beim pflanzenverfügbaren Ca²⁺ zu erkennen.

Im Oberboden beider Systeme traten höhere Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen auf als im Unterboden. Die Ausnahme war der Ca²⁺ - Gehalt, der im Oberboden der Hochbeete niedriger konzentriert war als im Unterboden.

Die Variabilität der Nährstoffkonzentrationen, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten, war in den Hochbeeten wesentlich größer als in den konventionellen Feldern. Deutlichstes Beispiel dafür war Calcium. Über die Genauigkeit der Mittelwertbildung gibt der Standardfehler Auskunft, der vor allem bei Ca²⁺ bei den Hochbeeten sehr hoch war. Auch bei Abzug des Standardfehlers lagen bei Ca²⁺ extrem hohe Konzentrationen vor.

Tab. 6: Pflanzenverfügbare Nährstoffvorräte in kg ha⁻¹ im Ober- und Unterboden in Hochbeeten und konventionellen Feldern

	Hochbeete			Konventionell		
	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺
0-20 cm	11 094	295	578	4473	205	379
20-40 cm	12 538	278	375	3816	177	131

Die Tabelle zeigt die Nährstoffvorräte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen (berechnet aus: Konzentrationen der Nährstoffe (Tab. 3) * (Gewicht des Bodens ha⁻¹) * 0,2 m⁻¹ Bodentiefe, unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte). Entsprechend den Konzentrationen waren die Nährstoffvorräte bei den Hochbeeten höher als im konventionellen System.

4.3.2 Wichtige Parameter zur Unterscheidung der Systeme (Diskriminanzanalyse)

Die Diskriminanzanalyse beurteilte als multivariates Verfahren über den zweiseitigen t-Test hinaus, welcher Parameter zum jeweiligen Zeitpunkt am stärksten zur Unterscheidung der Systeme beitrug, ohne nach Bodentiefen zu unterscheiden (vgl. 3.8.2). Sie stellt dar, wie deutlich die Systemunterschiede durch die Gesamtheit aller erhobenen bodenchemischen Parameter waren und wieviel einzelne bodenchemische Parameter zur Unterscheidung der Systeme beitrugen. Damit wurden die Parameter über den t - Test hinaus auch in ihrer Reihenfolge gewichtet.

Tab. 7: Diskriminanzanalyse: Anteil aller Parameter und Anteil und Rangfolge einzelner Parameter zur Unterscheidung von konventioneller Landnutzung und Hochbeeten zu drei Zeitpunkten (Z 1 und Z 2 Beginn und Ende von Vegetationszeit 1, Z 3 Beginn von Vegetationszeit 2)

Zeitpunkt	Gesamtparameter	Einzelparameter	
	Canonical Correlations	Canonical Correlations	
		%	
Z 1	92,4	EL	70,6
		Org. Substanz	64,1
		Org. Substanz und EL	88,8
Z 2	88,1	EL	72,6
		Ca ²⁺	68,6
		EL und Ca ²⁺	77,8
		EL, Ca ²⁺ und pH - Wert	85,0
		EL, Ca ²⁺ , pH - Wert und Mg ²⁺	86,3
Z 3	90,2	EL	79,8
		Ca ²⁺	63,3
		P Olsen	41,5
		EL und P Olsen	82,2
		EL, P Olsen und Ca ²⁺	85,8

Die Unterschiede zwischen konventioneller Landnutzung und Hochbeeten hinsichtlich aller erhobenen bodenchemischen Parameter waren zu jedem der drei Zeitpunkte hochsignifikant (Wilks' Lambda F - Statistic = 0,000). Im günstigsten Fall zum ersten Zeitpunkt erklärten bereits zwei Parameter 88 % von 92,4 % Gesamtunterschied zwischen den Systemen. Bodenchemische Unterschiede zwischen den beiden Systemen zeigten sich also bei der elektrischen Leitfähigkeit, die zu allen drei Zeitpunkten den wichtigsten Unterschied zwischen den Systemen bildete. Fast ebenso wichtig war zu Beginn der ersten Vegetationszeit die organische Substanz, die als zweitwichtigster Parameter neben der EL deutlich zum Systemunterschied beitrug (64,1 %). Zum Ende der ersten und zum Beginn der zweiten Vegetationszeit trennte Ca²⁺ als zweitwichtigster Parameter neben der EL die Systeme deutlich. Zu Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) spielte Phosphor als weiterer Parameter neben der EL und Ca²⁺ eine wichtige Rolle, weil es mit 41,5 % zum Gesamtunterschied zwischen den Systemen beitrug.

Alle bestimmten Parameter zusammen trugen jeweils zum Beginn der Vegetationszeiten (Z 1 und Z 3) mit 92,4 % und 90,2 % deutlicher zum Unterschied zwischen Hochbeeten und konventionellen Feldern bei, als zum Ende der ersten Vegetationszeit (Z 2).

4.3.3 Räumliche Variabilität der Systeme

Neben den deutlichen Systemunterschieden, die durch die statistischen Analysen herausgefiltert wurden, traten weitere Unterschiede auf. Sie ließen sich räumlich und zeitlich unterscheiden.

Tab. 8: Heterogenität der Hochbeete beschrieben durch bodenchemische Parameter (Mittelwerte $n = 5$ mit je 20 Einstichen, vgl. 3.5.2) im Mikroprofil (Einstich am östlichen Rand des Hochbeets, Einstich 80 cm vom Rand entfernt, Einstich in der Mitte des Hochbeets usw.) zu Beginn der zweiten Vegetationszeit

	Tiefe	Standort Hochbeete					Westl. Rand
		Standardfehler	Östl. Rand	Mitte, östlich	Mitte	Mitte, westlich	
Mittelwerte $n = 5$							
EL	0-20 cm	0,20	1,33	0,44	0,37	0,52	1,12
mS cm ⁻¹	20-40 cm	0,06	0,54	0,41	0,44	0,20	0,32
pH-Wert	0-20 cm	0,12	6,70	6,90	6,20	6,50	6,60
	20-40 cm	1,41	6,60	7,10	6,90	6,90	6,80
N _{gesamt} %	0-20 cm	0,03	0,23	0,32	0,25	0,37	0,30
	20-40 cm	0,02	0,38	0,42	0,37	0,31	0,31
P Ols. mg kg ⁻¹	0-20 cm	1,15	9,52	14,60	10,20	7,70	10,90
	20-40 cm	1,09	11,90	11,30	10,90	6,40	7,90
org. Subst. %	0-20 cm	0,58	2,70	4,03	3,03	5,90	4,50
	20-40 cm	0,52	5,50	6,60	6,40	3,90	4,70
Na ⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	0,83	6,00	2,90	1,70	2,30	4,90
	20-40 cm	0,40	3,60	3,70	3,00	1,60	2,30
K ⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	0,12	1,33	1,74	1,74	1,23	1,28
	20-40 cm	0,37	1,48	1,69	2,05	1,02	3,20
Ca ²⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	4,57	66,50	82,6	61,90	78,40	84,60
	20-40 cm	6,06	84,60	91,9	88,20	58,30	77,00
Mg ²⁺ cmol (+) kg ⁻¹	0-20 cm	2,44	12,60	24,00	20,80	21,80	26,90
	20-40 cm	3,45	11,70	31,70	25,30	18,20	19,30

Die Tabellen 8 und 9 beschreiben die Nährstoffvariabilität in kleinem Maßstab (Querprofil) auf den Hochbeeten und den konventionellen Feldern. Die Nährstoffgehalte und deren Verteilung im Boden machten die starke Heterogenität der Hochbeete auf kleinem Raum (Querprofil) deutlich. Werden die Nährstoffkonzentrationen an Standort 1 bis 5 im Ober- und Unterboden der Hochbeete verglichen, war die Schwankung deutlich höher als auf den konventionellen Feldern. Die organische Substanz im Oberboden schwankte zum Beispiel um 3,2 % (von 2,7 % bis 5,9 %). Im konventionellen System betrug die Differenz nur 0,49 %. Die Nährstoffverteilung in den konventionellen Feldern war demnach homogener.

Bei den Hochbeeten waren bei den Parametern EL und Na^+ , Rand – Mitte - Effekte zu beobachten. So war die Leitfähigkeit im Oberboden an den Rändern am höchsten und nahm zur Mitte ab. Der gleiche Effekt trat bei Na^+ auf.

Tab. 9: Heterogenität konventioneller Felder beschrieben durch bodenchemische Parameter (Mittelwerte $n = 5$ in einer Linie: Einstich bei 0,0 m; bei 0,8 m usw. mit je 20 Einstichen, vgl. 3.5.2) im Mikroprofil zu Beginn der zweiten Vegetationszeit

	Tiefe	Standort Konventionell					3,2 m
		Standard- fehler	0,0 m	0,8 m	1,6 m	2,4 m	
Mittelwerte $n = 5$							
EL	0-20 cm	0,03	0,25	0,45	0,36	0,35	0,31
mS cm^{-1}	20-40 cm	0,01	0,12	0,14	0,12	0,18	0,14
pH-Wert	0-20 cm	0,07	7,30	7,30	6,90	7,20	7,20
	20-40 cm	0,06	7,20	7,20	7,20	7,40	7,00
N_{gesamt} %	0-20 cm	0,01	0,17	0,25	0,24	0,23	0,24
	20-40 cm	0,01	0,19	0,18	0,14	0,18	0,18
P Ols. mg kg^{-1}	0-20 cm	4,45	14,20	17,60	12,80	14,60	36,70
	20-40 cm	0,78	6,90	9,90	6,60	8,70	10,50
org. Subst. %	0-20 cm	0,10	2,90	3,30	3,03	2,81	3,26
	20-40 cm	0,12	1,40	0,90	1,27	1,60	1,38
Na^+ cmol (+) kg^{-1}	0-20 cm	0,32	3,30	3,80	3,30	2,80	4,70
	20-40 cm	0,89	2,90	3,20	1,50	2,90	6,80
K^+ cmol (+) kg^{-1}	0-20 cm	0,06	1,07	0,92	1,23	1,18	0,97
	20-40 cm	0,06	1,23	1,02	0,97	1,18	0,92
Ca^{2+} cmol (+) kg^{-1}	0-20 cm	1,80	47,90	53,20	52,30	43,50	46,70
	20-40 cm	0,94	35,20	39,10	34,30	36,50	38,70
Mg^{2+} cmol (+) kg^{-1}	0-20 cm	0,22	11,80	12,90	12,20	11,60	12,20
	20-40 cm	0,33	17,30	17,90	16,00	16,90	17,60

4.3.4 Zeitliche Variabilität der Systeme

Um die saisonale Dynamik der bodenchemischen Parameter und damit die Nachhaltigkeit in beiden Systemen darzustellen wurden die Parameter ausgewählt, die bei der Diskriminanzanalyse jeweils zu den drei Zeitpunkten am stärksten zur Unterscheidung der Systeme beitrugen: die elektrische Leitfähigkeit, die org. Substanz, Ca^{2+} und P (Olsen). In den Grafiken ist die saisonale Entwicklung dieser Parameter von Z 1 bis Z 3 dargestellt. Gezeigt werden damit zeitliche Tendenzen in beiden Systemen. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Zeitpunkten zu charakterisieren, wurde der Standardfehler der Parameter berechnet. Waren die Änderungen zwischen den Zeitpunkten größer als der Standardfehler, traten signifikante Unterschiede auf.

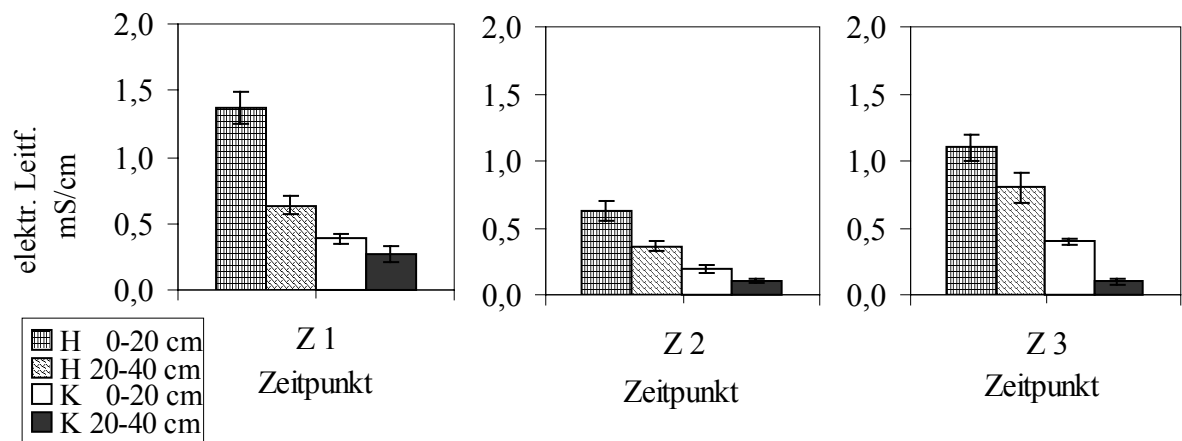


Abb. 11: Elektrische Leitfähigkeit (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1 und Z 2 (1997 / 98), und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Die elektrische Leitfähigkeit war im Boden der Hochbeete in beiden Tiefen deutlich höher als im konventionellen System. Sie war in beiden Systemen im Oberboden höher als im Unterboden. In beiden Systemen sank sie in beiden Bodentiefen während der Vegetationszeit ab, am stärksten in 20 cm Tiefe bei den Hochbeeten, trotz aufwärts gerichteter Bodenwasserbewegung (vgl. Abb. 10 a, b, und c). Während der anschließenden Trockenzeit stieg sie erneut an; bei den Hochbeeten in 20 cm Bodentiefe nicht ganz auf das ursprüngliche Niveau, in 40 cm Tiefe über das ursprüngliche Niveau hinaus. Im konventionellen System stieg die Leitfähigkeit in 20 cm Tiefe wieder auf den Anfangswert an, während in 20 - 40 cm Bodentiefe die Leitfähigkeit gleich blieb. Die saisonale Änderung der elektrischen Leitfähigkeit im Ober- und Unterboden verlief in beiden Systemen ähnlich. Im zeitlichen Verlauf gab es keine Systemunterschiede.

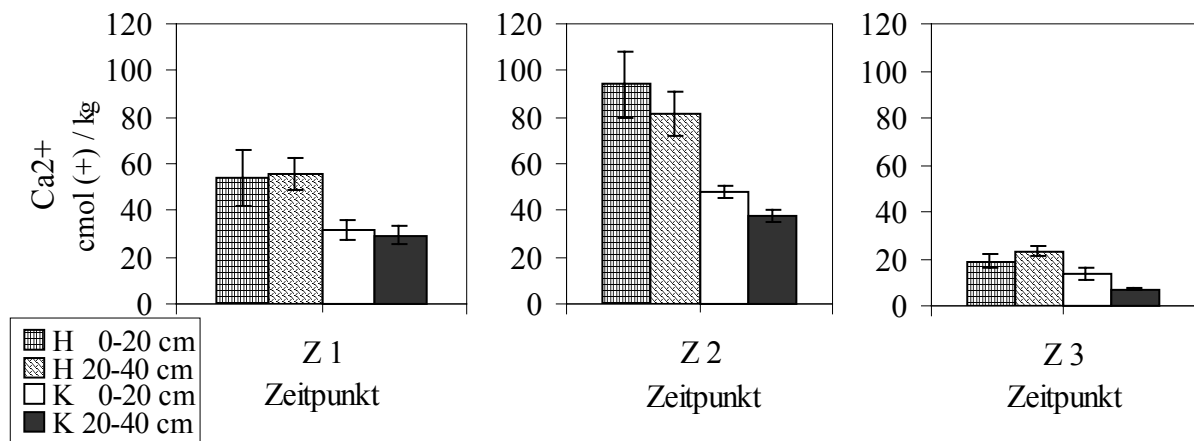


Abb. 12: Ca²⁺ - Konzentrationen (Mittelwerte n = 8, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, Z 2, (1997/98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit Z 3, (1998/99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Die Ca²⁺ - Konzentrationen im Boden waren ebenfalls bei den Hochbeeten deutlich höher als bei den konventionellen Feldern. In beiden Systemen waren die Konzentrationen im Oberboden höher als im Unterboden. Sie stiegen während der Vegetationszeit in beiden Systemen an (Z 1 – Z 2), jeweils etwas stärker im Oberboden, und nahmen in der darauffolgenden Trockenzeit (Z 3) ab. Und zwar unter das Ausgangsniveau der Ca²⁺ - Konzentrationen zu Beginn der ersten Vegetationszeit.

Die saisonale Veränderung der Ca²⁺ - Konzentrationen im Ober- und Unterboden war wie bei der elektrischen Leitfähigkeit ähnlich in beiden Systemen.

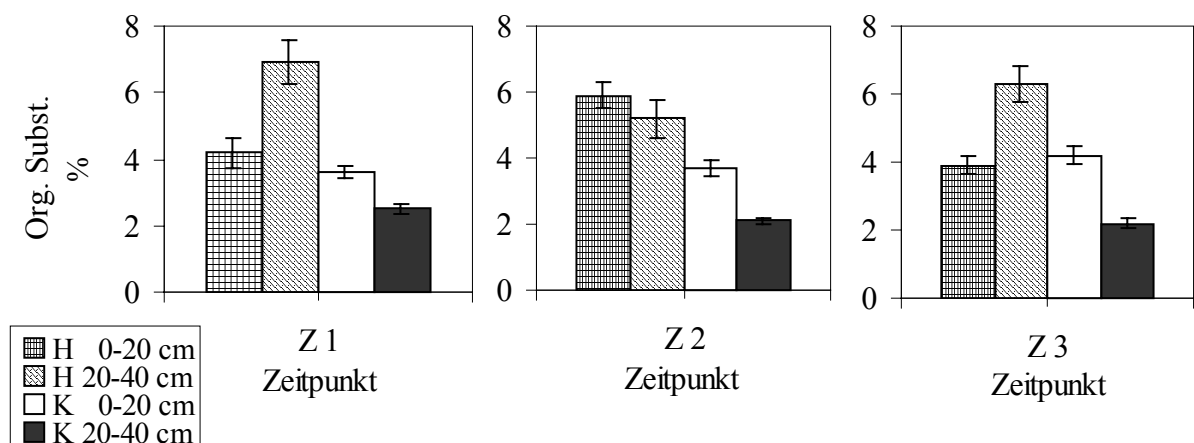


Abb. 13: Gehalte an org. Substanz (berechnet aus C_{org.}) (Mittelwerte n = 8, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, 2, (1997/98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit, Z 3, (1998/99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Die Gehalte an organischer Substanz, berechnet aus der Bestimmung von organischem Kohlenstoff, waren bei den Hochbeeten höher als bei den konventionellen Feldern. Vor allem im Unterboden war ein deutlicher Unterschied zum konventionellen System zu sehen. Die organische Substanz im Oberboden nahm während der Vegetationszeit zu (Z 1 – Z 2), und danach während der Trockenzeit bis zum Beginn der nächsten Vegetationszeit auf das ursprüngliche Niveau wieder ab. Im Unterboden zeigte sich genau der gegenteilige Effekt, die organische Substanz nahm erst ab und stieg in der Trockenzeit wieder an. Im konventionellen System dagegen variierte die organische Substanz zu den drei Zeitpunkten kaum. Sie blieb annähernd konstant und war im Oberboden höher als im Unterboden.

Die saisonale Veränderung der Gehalte an organischer Substanz verlief bei den Hochbeeten im Oberboden und Unterboden gegenläufig. Bei den konventionellen Feldern fand keine saisonale Veränderung der Gehalte an organischer Substanz statt, die Gehalte blieben konstant. Die organische Substanz war der erste Parameter, bei dem Hochbeete und konventionelle Felder unterschiedliche saisonale Verläufe zeigten.

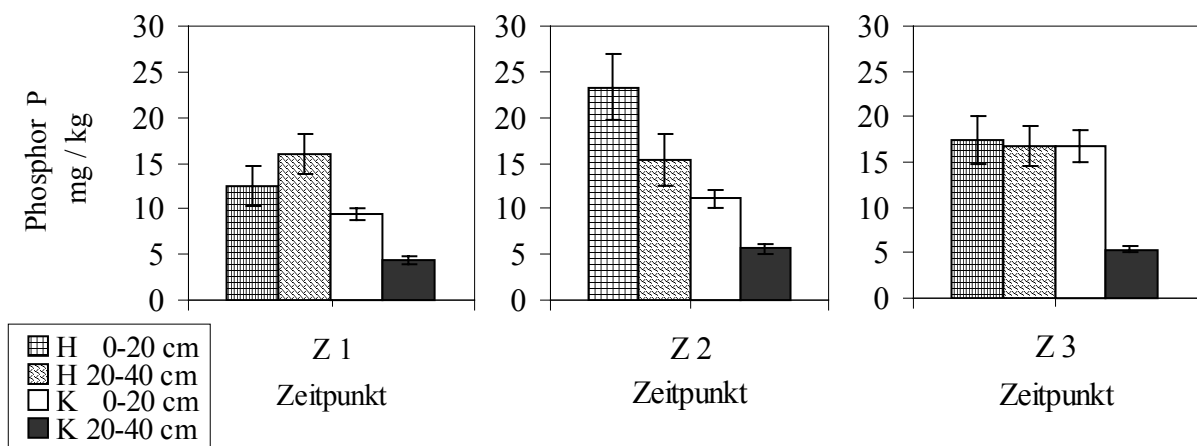


Abb. 14: Phosphorkonzentrationen (Mittelwerte $n = 8$, mit Standardfehler) zu Beginn und zum Ende der ersten Vegetationszeit Z 1, Z 2, (1997 / 98) und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit, Z 3, (1998 / 99) im Ober- und Unterboden von Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Die Phosphorkonzentrationen im Boden waren insgesamt in den Böden der Hochbeete höher als in denen der konventionellen Felder (Abb. 14). Im Unterboden blieben zu allen drei Zeitpunkten die Phosphorkonzentrationen in beiden Systemen relativ konstant. Im Oberboden der Hochbeete dagegen nahmen die Phosphorkonzentrationen während der Vegetationszeit stark zu. Während der folgenden Trockenzeit sanken sie wieder etwas ab, jedoch nicht ganz auf das ursprüngliche Niveau zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Z 1), so daß langfristig Phosphor angereichert werden konnte. Im Oberboden der konventionellen Felder stiegen die Phosphorkonzentrationen während der Vegetationszeit nur leicht an. In der nachfolgenden Trockenzeit stiegen die Phosphorkonzentrationen stärker an, so daß sie zu Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) mit $16,8 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden höher waren als zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Z 1) mit $9,4 \text{ mg kg}^{-1}$ Boden. Auch die Konzentrationen von Phosphor,

ähnlich wie bei der org. Substanz entwickelten sich während der zwei Vegetationszeiten im Boden der Hochbeete anders als im Boden der konventionellen Felder.

4.3.5 Nährstoffvorräte in Hochbeeten und konventionellen Feldern

Mit der folgenden Tabellen werden die Nährstoffvorräte für beide Systemen dargestellt unter Berücksichtigung der Nährstoffzufuhr aufgrund der erfolgten Düngung mit $7,5 \text{ t ha}^{-1}$. Die Nährstoffeinträge durch Niederschläge werden vernachlässigt

4.3.5.1 Qualität des Bewässerungswassers

Tab. 10: Nährstoffgehalte (Einzelwerte) im Bewässerungswasser der Kanäle der Hochbeete

	EL	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺ - Quotient	K ⁺	SAR - Wert	NH ₄ ⁺ - N
	mS cm ⁻¹		mval l ⁻¹				ppm		mg l ⁻¹
						Einzelwerte			
Kanal 13 Anfang	0,30	7,1	18	10	0,4	36	3	0,15	0,6
Kanal 13 Mitte	0,28	7,1	19	11	0,4	36	4	0,16	0,8
Kanal 13 Ende	0,32	7,4	22	14	0,4	39	5	0,14	0,8
Kanal 10 Anfang	0,39	6,9	3	2	0,5	38	2	0,46	1,7
Kanal 10 Mitte	0,30	7,7	20	11	0,4	34	2	0,14	1,7
Kanal 10 Ende	0,35	7,6	14	10	0,6	42	4	0,23	2,2
Kanal 8 Anfang	0,26	7,5	17	10	0,5	37	4	0,20	0,6
Kanal 8 Mitte	0,17	7,6	11	7	0,5	39	3	0,25	0,6
Kanal 8 Ende	0,27	8,6	19	13	0,5	41	4	0,18	1,7
Kanal 4 Anfang	0,26	7,3	17	10	0,4	37	3	0,17	1,7
Kanal 4 Mitte	0,22	7,4	15	11	0,5	42	4	0,19	1,4
Kanal 4 Ende	0,22	7,8	16	10	0,2	38	2	0,09	0,6
Kanal 3 Anfang	0,17	8,2	3	2	0,6	45	4	0,49	0,6
Kanal 3 Mitte	0,20	9,8	13	11	0,7	46	7	0,28	0,6
Kanal 3 Ende	0,32	9,6	15	25	0,9	63	6	0,29	2,0

Der Mg²⁺ - Quotient wurde berechnet aus: $(\text{Mg}^{2+} * 100) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ in mval l⁻¹ (ACHTNICH 1980, S.115). Der SAR - Wert wurde berechnet aus: $\text{SAR} = \text{Na}^+ / ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})^{0,5}) / 2$ in mval l⁻¹ (RICHARDS 1962, S.78).

Eine Nährstoffzufuhr durch das Bewässerungswasser in die Hochbeete fand vermutlich nicht statt, da die Nährstoffkonzentrationen zum Ende eines Kanals hin in den meisten Fällen zunahmen, so daß vermutet werden kann, daß die Nährstoffe aus den Hochbeeten in die Kanäle diffundierten. Ein Eintrag in die Hochbeete von NH₄⁺ fand jedoch aus Kanal 4 statt, die Werte verringerten sich im Kanalverlauf. In den übrigen Kanälen nahmen die

Konzentrationen zum Ende hin zu. Die elektrische Leitfähigkeit nahm zur Mitte hin ab und stieg zum Ende hin wieder an.

Tab. 11: Nährstoffvorräte in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Nährstoffkonzentrationen * Gewicht des Bodens * ha^{-1} * $0,2 \text{ m}^{-1}$, unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte) im Ober- und Unterboden in zwei Landnutzungssystemen zu Beginn von Vegetationszeit 2

System		Dichte	Org. Subst.	N_{gesamt}	P Ols.	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		g cm^{-3}	t ha^{-1}	kg ha^{-1}					
Hochbeete									
0-20 cm	1,23	96	7380	43	2886	1631	9298	6317	
20-40 cm	1,13	155	9840	41	2433	2686	11512	7084	
Konventionell									
0-20 cm	1,23	95	4520	38	2235	1145	6056	6807	
20-40 cm	1,27	56	5080	13	1519	3566	3505	724	
Nährstoffzufuhr mit 7,5 t Rindermist, berechnet aus Durchschnittswerten in LANDON (1992, S.403)				52,5	7,5	37			

In Tabelle 11 werden die Nährstoffvorräte in den Hochbeeten und den konventionellen Feldern gezeigt unter Berücksichtigung der Nährstoffzufuhr durch Düngung. Beide Systeme wurden mit $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ Rindermist zur Saat gedüngt. Die Nährstoffvorräte waren bei den Hochbeeten im Ober- und Unterboden höher als bei den konventionellen Feldern. Besonders deutlich waren die Unterschiede zwischen den Systemen im Unterboden bei P (Olsen), mit 41 kg ha^{-1} in den Hochbeeten gegenüber 13 kg ha^{-1} in den konventionellen Feldern, Calcium mit 11512 gegenüber 3505 kg ha^{-1} und der organischen Substanz, mit 155 t ha^{-1} im Unterboden der Hochbeete und 56 t ha^{-1} im Unterboden der konventionellen Felder (Tab. 11). Insbesondere die Vorräte der org. Substanz waren im Unterboden der Hochbeete sehr hoch.

4.3.6 Zusammenfassende Beschreibung der Teilergebnisse des Kapitels Bodennährstoffgehalte

Beim Kartoffelanbau auf Hochbeeten wurden im Vergleich zu konventionellem Anbau deutliche Unterschiede der elektrischen Leitfähigkeit in den Böden festgestellt. Sie war als wichtigster bodenchemischer Parameter im Ober- und Unterboden der Hochbeete zum Beginn und Ende der Vegetationszeit 1997/98 und zum Beginn der zweiten Vegetationszeit 1998/99 signifikant höher. Zu Beginn der ersten Vegetationszeit 1997/98 war die organische Substanz der zweitwichtigste Parameter, der die Systeme unterschied. Zum

Beginn der zweiten Vegetationszeit war P Olsen der zweitwichtigste Parameter zur Unterscheidung der Systeme. Die Gehalte waren bei den Hochbeeten im Unterboden signifikant höher als bei den konventionellen Feldern. Die Konzentrationen an $N_{\text{ges.}}$, P (Olsen) und austauschbaren Kationen (v.a. Ca^{2+}) waren zu allen drei Zeitpunkten im Unterboden der Hochbeete signifikant höher, zum Ende der ersten Vegetationszeit (Z 2) auch im Oberboden.

Die Heterogenität der Nährstoffverteilung war bei den Hochbeeten größer als im konventionellen System.

Die zeitliche Entwicklung der Konzentrationen der wichtigen bodenchemischen Parameter organische Substanz und Phosphor verlief vom Beginn der ersten bis zum Beginn der zweiten Vegetationszeit in Hochbeeten und konventionellen Feldern unterschiedlich.

Die Nährstoffvorräte in den Böden der Hochbeete waren, bezogen auf die gemessenen Konzentrationen, höher als im konventionellen System.

4.4 Erträge auf Hochbeeten und bei konventioneller Landnutzung

Die Erträge von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) wurden in beiden Systemen zum Ende der ersten Vegetationszeit erhoben. Die Vegetationszeit im Untersuchungsgebiet begann im Oktober und dauerte bis Anfang April. Nach den ersten Niederschlägen im Oktober erfolgte die Saat, die Ernte wurde Anfang April durchgeführt. Aufgrund der ausgeprägten Saisonalität ist nur eine Ernte pro Jahr möglich, da während der anschließenden Trockenzeit (Mai bis September) kein Niederschlag auftritt und die Temperaturen stark absinken. Auch Anbau unter Bewässerung wird nur während der Vegetationszeit praktiziert.

4.4.1 Produktivität durch Einzelpflanzenenerträge

Um die erwarteten Systemunterschiede zwischen Hochbeeten und konventionellen Feldern zu verdeutlichen, wurden die Einzelpflanzenenerträge und die Gesamterträge pro Hektar bestimmt (vgl. 3.5.1).

Tab. 12: Mittlerer Einzelpflanzenenertrag (kg Pflanze^{-1} , $n = 176$) und Ertrag pro Hektar (kg ha^{-1}) bei idealem Pflanzenbestand ($44\,444 \text{ Pflanzen ha}^{-1}$, ermittelt aufgrund der üblichen Reihen- und Pflanzabstände vgl. 3.5.1) von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) auf Hochbeeten und konventionellen Feldern

Landnutzungssystem	Einzelpflanzenenertrag		
	n = 176		
	kg Pflanze^{-1}	kg ha^{-1}	t ha^{-1}
Hochbeete	1,24	55 201	55,2
Konventionell	1,22	54 039	54,0

Bei der Erhebung der Erträge zum Ende der ersten Vegetationszeit wurden nur geringfügige Systemunterschiede festgestellt. Die Einzelpflanzenenerträge auf den Hochbeeten und im konventionellen System unterschieden sich kaum. Deutlicher war der Unterschied zwischen beiden Landnutzungssystemen im Ertrag ha^{-1} . Auf den Hochbeeten wurden 1,2 t mehr geerntet.

5. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde ein agrarökologischer Vergleich des Kartoffelanbaus auf traditionellen Hochbeeten und unter konventioneller Landnutzung in der Region des Titicacasees durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse bewertet und deren Bedeutung im Hinblick auf die Vor- und Nachteile beider Nutzungssysteme diskutiert. Außerdem werden die Ergebnisse dieser Arbeit den Ergebnissen und Schlußfolgerungen anderer Autoren auf diesem Gebiet gegenübergestellt.

5.1 Lufttemperaturen

Ein Vorteil des Nutzungssystems der Hochbeete bestand in der Abmilderung der Luftminimumtemperaturen im bodennahen Bereich der Grünmasse der Kartoffelpflanzen. Bei der "normalen" Kartoffel (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigena*, Sorte Sani Imilla) liegt die Schwelle zu starken Frostschäden vom Wachstumsbeginn bis zur Blüte bei -3 °C , nach der Blüte bereits bei -2 °C (LE TACON et al. 1992, S.287). Die Bitterkartoffel (*Solanum juzepczukii*, Sorte Luki) weist mit -5 °C eine merklich höhere Temperaturtoleranz auf (ESTRADA 1991, AGUILAR 1992). Eine weitere Gefahr durch Frost besteht in der Unterbrechung der Nährstoffaufnahme, die während der Blüte am höchsten ist (FINCK 1979, S.308).

Die vorliegenden Ergebnisse des außergewöhnlich trockenen Anbaujahres 1997/98 wiesen für die konventionell bearbeiteten Felder Minimumlufttemperaturen von $-3,1\text{ °C}$ und für die Hochbeete von $-2,5\text{ °C}$ in 10 cm Höhe aus (Abb. 1 und 2, Tab. 13). Die Unterschiede zugunsten der Hochbeete fielen mit $0,6\text{ °C}$ im Vergleich zu anderen Untersuchungen relativ gering aus (Tab. 13). Die Minimumlufttemperaturen von $-3,1\text{ °C}$ könnten jedoch auf den konventionellen Feldern beim Anbau von normalen Kartoffeln bereits zu Ertragsminderungen geführt haben, während das Anbausystem der Hochbeete Frostschäden verhindert haben dürfte.

Ertragsminderung durch Frost sind bei der normalen Kartoffel (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigena*) am stärksten ausgeprägt. Danach wurden auf konventionell bewirtschafteten Feldern 80 % der potentiellen Ernte durch Frost zerstört (physiologische Schädigung durch Zerstörung der Blattmasse), auf 6 Jahre alten sowie neu angelegten Hochbeeten dagegen lediglich 10 % bis 50 %. Bei den frostresistenteren Bitterkartoffeln wurden auf konventionellen Feldern 50 % durch Frost zerstört, auf 6 Jahre alten Hochbeeten 40 % und auf den neuen Hochbeeten 10 % VACHER et al. (1992, S.55).

Die Ergebnisse dieser Arbeit erweiternd stellten SANCHEZ DE LOZADA (1998, S.250) auch in 50 cm Höhe Unterschiede in den Minimumlufttemperaturen von 1 °C und VILLANUEVA et al. (1994, S.42) von $0,67$ bis $1,36\text{ °C}$ in 30 cm Höhe zugunsten der Hochbeete fest. Von AGUILAR et al. (1994, S.124) wurden auch im vertikalen Minimumlufttemperaturgradienten ($0,1$; $0,6$ und $1,1$ m Höhe) hochsignifikante Unterschiede zwischen den Systemen beschrieben. Die mittleren Luftminimumtemperaturen sanken in allen Höhen im konventionellen

System tiefer ab als bei den Hochbeeten und zeigten höhere Unterschiede zwischen den einzelnen Höhen.

Tab. 13: Zusammenstellung von Luftminimumtemperaturen auf Hochbeeten und konventionell bewirtschafteten Feldern in 10 cm Höhe nach verschiedenen Autoren

	Minimumlufttemperatur in 10 cm Höhe			Zeitraum	Bemerkungen
	Hochbeete	Konventionell	Differenz zugunsten der Hochbeete		
vorliegende Arbeit	- 2,5	- 3,1	0,6	1997 / 98	5 m breite Hochbeete, 2,5 m breite Kanäle
VACHER et al. (1992, S.55)	- 2,5	- 4,5	2	1990 / 91 Feb., März, April	neu konstruierte Hochbeete
	- 3,5	- 4,5	1	"	6 Jahre alte Hochbeete
VILLANUEVA et al. (1994, S.42)			0,7 bis 1,3	1992 / 93 Feb., März, April, Mai	bei Absinken bis - 6
			0,2 bis 2,1	"	"
			0,9 bis 1,6	"	bei Absinken bis - 12
			1,4 bis 3,3	"	"
DE LA CUBA et al. (1994, S.45)			0,8	1992 / 93	5 m breite Hochbeete
			1,9	"	3 bis 4 m breite Hochbeete
AGUILAR et al. (1994, S.124)			1,9	1992 / 92	5 m breite Hochbeete (in der Mitte gemessen)
			2,0	"	(am Rand gemessen)
			1,5	"	10 m breite Hochbeete

5.2 Bodentemperaturen

Die größte Frostgefahr besteht laut MURILLO et al. (1992, S.233) von 4.00 bis 6.00 Uhr da gegen 6.00 Uhr, kurz vor Sonnenaufgang, die tiefsten Tagesminimumtemperaturen eintreten (FRANCOIS et al. 1998). In der vorliegenden Arbeit lagen die mittleren Bodentemperaturen im Tagesverlauf auf den konventionell bewirtschafteten Feldern zwar in beiden Bodentiefen höher (Abb. 3 a, b), im kritischen Zeitraum zwischen 5.00 und 8.00 Uhr morgens, wurden jedoch in den Hochbeeten in 10 cm Tiefe 0,1 bis 0,3 °C höhere Temperaturen gemessen (Abb. 3 a). Die Hochbeete zeigten also zu dem Zeitpunkt der höchsten Frostgefahr Vorteile gegenüber den konventionellen Feldern. Da sich laut ILACO (1981 S.16) tägliche Lufttemperaturschwankungen bis in eine Tiefe von 50 cm auswirken können, ist zu vermuten, daß auch die Lufttemperaturen auf den Hochbeeten in diesem Zeitraum geringfügig höher waren als auf den konventionellen Feldern.

Auf den konventionellen Feldern wurden in dieser Arbeit im Oktober 1997 absolute Minimumtemperaturen von $-3,4\text{ °C}$ in 10 cm Tiefe gemessen (Abb. 4 a). Die obere Wurzelmasse der Bitterkartoffeln war also in diesem Anbausystem stärker gefährdet als auf den Hochbeeten, bei denen mit $6,1\text{ °C}$ die absoluten Minimumtemperaturen im positiven Bereich blieben.

Im Vegetationsverlauf des außergewöhnlichen Anbaujahres 1997 / 98 zeigten die Hochbeete Vorteile, weil die mittleren Minimumtemperaturen ebenso wie die Maximumtemperaturen in beiden Bodentiefen (10 und 30 cm) über denen des konventionellen Systems lagen (Abb. 4). Die höheren mittleren Minimumtemperaturen in beiden Tiefen wirken sich vor allem positiv auf das Wurzelsystem konventioneller Kartoffelarten (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigena*) aus, das nur Tiefen bis 35 cm erreicht. Bei den Hochbeeten war aufgrund der in 10 cm Tiefe nicht so tief absinkenden Minimumtemperaturen die Gefahr einer Saatgutschädigung geringer als im konventionellen System. Besonders empfindlich gegenüber Frösten sind Bitterkartoffeln in der phänologischen Phase von Wachstumsbeginn bis zur ersten Blüte (CHAMBILLA 1994). Zwar erholen sich die Bitterkartoffeln zu Wachstumsbeginn von Frost besonders gut, v.a. bei Verwendung von gesundem Saatgut CHAMBILLA (1994). Da jedoch gesundes Saatgut nicht immer vorliegt, boten die Hochbeete hiermit einen zusätzlichen Schutzfaktor. Die im Vergleich zu den konventionell bewirtschafteten Flächen höheren Maximaltemperaturen in 10 cm Bodentiefe der Hochbeete (Abb. 4), lassen vermuten, daß die obere Bodenschicht in diesem System aufgrund einer günstigeren Bodenstruktur leichter erwärmbar war, was auf die relativ hohen Gehalte an organischer Substanz zurückzuführen sein könnte (Tab. 3).

Die erste Vegetationszeit lag durch das Auftreten des „El Niño“ Phänomens (1997 / 98) in einem außergewöhnlichen Anbaujahr. Der Jahresniederschlag war mit 420 mm (Projektdatei PROSUKO) geringer als der durchschnittliche Jahresniederschlag für das Gebiet mit 660 mm (siehe 2.1). Die Variabilität der Niederschläge war höher und Fröste traten durch die Trockenheit häufiger auf. Die Unterschiede zwischen den Monatsmitteln der niedrigsten Bodentemperaturen waren deshalb deutlich ausgeprägt, in 10 cm Bodentiefe im Oktober mit $9,5\text{ °C}$ (Hochbeete $6,1$ und Konventionell $-3,4\text{ °C}$) im November mit $11,5\text{ °C}$ (Abb. 4 a). Daraus folgt, daß die Hochbeete vor allem in Jahren mit extremen Witterungsbedingungen, Vorteile gegenüber konventioneller Landnutzung aufweisen.

1998 / 99, in einem klimatisch durchschnittlichen Anbaujahr, wurden zwar in den konventionell bewirtschafteten Feldern in beiden Tiefen höhere mittlere und maximale Minimumtemperaturen im Vegetationsverlauf gemessen, entscheidend ist jedoch, daß die absoluten Minimumtemperaturen auch in einem durchschnittlichen Jahr bei den Hochbeeten im Oktober um $0,6$; im November um $0,8$ und im Dezember um $0,4\text{ °C}$ höher lagen als in den konventionellen Feldern (Abb. 5 a).

In beiden Jahren waren die Temperaturschwankungen in 10 cm Tiefe bei den Hochbeeten geringer ausgeprägt (Abb. 4 und 5 a). Eine unter den gegebenen Bedingungen einfache Maßnahme, um in dieser Tiefe die saisonalen, aber auch die täglichen Bodentemperatur-

schwankungen, und damit Fröste, in den konventionellen Feldern zu mildern, bestände im Bedecken mit Mulch (ILACO 1981, S. 19).

Die maximalen Minimumtemperaturen wurden in der zweiten Vegetationszeit in 10 cm Tiefe gemessen, in der ersten hingegen in 30 cm Tiefe. Zur zweiten Vegetationszeit boten also die konventionellen Felder mit den höheren mittleren Minimumtemperaturen und den höheren Maxima in beiden Bodentiefen günstigere Bedingungen zur Saat, während in der ersten Vegetationszeit die Hochbeete diese Vorteile aufwiesen.

5.3 Bodenfeuchte

Hinsichtlich der Entwicklung der Bodenfeuchte ließ sich die Vegetationszeit 1997 / 98 klar in zwei Zeitabschnitte gliedern. Von Beginn bis zum 01.02.1998 wurden relativ ausgeglichene Bodenwasserspannungen gemessen und die Bodenfeuchte zwischen den Tiefen (15 cm und 25 cm) unterschied sich deutlich. Im zweiten Zeitabschnitt der Vegetationszeit traten starke Schwankungen im Bodenwassergehalt auf, die Unterschiede zwischen Ober- und Unterboden gingen jedoch deutlich zurück (Abb. 6 bis 9). Die Ursache für diese Entwicklung liegt darin, daß in den ersten zwei Monaten lediglich die Bodenevaporation den Bodenwassergehalt verringerte und diese Verluste durch die Niederschläge in diesem Zeitraum ausgeglichen werden konnten. Mit Beginn des zweiten Abschnitts nahm die Bodenevaporation ab und die Evapotranspiration stieg durch erhöhte Blattmasse- und Knollenbildung an. Die Niederschläge konnten den zunehmenden Bedarf der Pflanzen nicht mehr durchgängig decken, und es kam zu kurzfristig stark wechselnden Bodenfeuchtegehalten in 15 cm Tiefe. Der Übergang zwischen den beiden Zeitabschnitten stimmte mit der phänologischen Phase der beginnenden Knollenbildung (Ende Januar) und der 3. Blüte bei den Bitterkartoffeln überein (VARGAS et al. 1998, S.56), zu der der Pflanzenwasserverbrauch (mm / Tag) sein Maximum erreicht (ACHTNICH 1980). Die stärkste Zunahme der Variation der Bodenfeuchteschwankung mit 117 % (Tab. 2) wurde auf den konventionell bewirtschafteten Feldern (Standort 1) in 15 cm Tiefe festgestellt. Dieses ist auf das Fehlen der ausgleichenden Wirkung der Bewässerung zurückzuführen, die auf den Hochbeeten durch seitliche Infiltration unabhängig von den Niederschlägen relativ gleichbleibende Bodenfeuchtebedingungen gewährleistete.

Die vergleichsweise hohe Bodenwasserspannung im ersten Drittel der Vegetationszeit (Periode 1) in der Mitte der Hochbeete (Abb. 6 bis 8) könnte durch das ansteigende Wasser der Kanäle verursacht worden sein, das zuerst die Seiten der Hochbeete und zeitverzögert die Mitte der Hochbeete erreichte. Es war also ein Potentialgefälle vom Rand zur Beetmitte hin gegeben. Wahrscheinlich bewirkten die Kanäle also eine zur Mitte der Hochbeete hin ausgerichtete laterale Wasserbewegung.

Der wichtigste Unterschied zwischen den Systemen bestand in der unterschiedlichen Verteilung der Bodenfeuchte während der Vegetationszeit 1997 / 98. Bei den drei Hochbeeten war die Bodenfeuchtigkeit jeweils in 25 cm Tiefe, bei den konventionellen Feldern dagegen in 15 cm Tiefe höher (Abb. 6 bis 9). Verursacht wurden die höheren Gehalte bei den

Hochbeeten in 25 cm Tiefe wahrscheinlich durch das seitlich infiltrierende Wasser aus den Kanälen. Ein weiterer Grund könnte der große Vorrat an org. Substanz mit 155 t ha^{-1} (Tab. 11) im Unterboden der Hochbeete sein, der steigernd auf die Wasserspeicherkapazität des Bodens wirkt. Da die Kartoffeln ihren Wasserbedarf nicht direkt durch Niederschläge, sondern hauptsächlich durch starke Nutzung der Bodenfeuchte decken, und die Anzahl der Knollen pro Pflanze sowie das Durchschnittsgewicht der Knollen in einen starken Zusammenhang mit dem Wasserverbrauch stehen (VACHER et al. 1988, S.157), kommt dem Boden als Wasserspeicher für die Pflanzen eine große Bedeutung zu.

Die mikrobielle Aktivität im Unterboden wird durch die höhere Bodenfeuchte in 25 cm Tiefe der Hochbeete positiv beeinflusst, denn Untersuchungen von MIRANDA (1998, S.25ff.) stellten eine hohe positive Korrelation zwischen Bodenfeuchtigkeit und Anzahl der Bakterien fest.

Von großer Bedeutung war ebenfalls die Richtung der Bodenwasserbewegung. Bei den Hochbeeten erfolgte überwiegend kapillarer Aufstieg. Bei den konventionellen Feldern hingegen war die Bodenwasserbewegung vorwiegend nach unten gerichtet. Der kapillare Aufstieg in den Hochbeeten führte zu relativ ausgeglichenen Bodenwassergehalten und hat deshalb den Vorteil, daß die physiologische Entwicklung der Kartoffel während der Knollenbildungsphase, in der der Wasserbedarf sehr hoch ist und sich hier auftretende Wasserdefizite stark auf die Ertragsbildung auswirken (VACHER et al. 1988, S.161), unabhängig von den unregelmäßigen Niederschlägen während der Vegetationszeit erfolgen kann.

Die Empfindlichkeit der Kartoffeln gegenüber Trockenheit ist im Zeitraum von der Saat bis zum Auflaufen besonders hoch und steigt während der anschließenden Stolonenbildung noch an (VACHER et al. 1992). Die im Untersuchungsgebiet angebaute Bitterkartoffel (*Solanum juzepczukii*, Sorte Luki) durchläuft im Vergleich zu den anderen Kartoffelarten eine längere vegetative Phase von 170 bis 180 Tagen gegenüber 160 bis 170 Tagen (LESCANO 1994). Auch die Auflaufphase selbst, bei der die Pflanze aus dem Boden tritt, ist länger. Dies hebt die Bedeutung einer optimalen Wasserversorgung und damit die Vorteile des Hochbeetsystems in dieser Periode hervor.

Auch die Saatzeitpunkte, die sonst von den ersten Niederschlägen abhängig sind, können entsprechend früher gewählt werden. Das wirkt sich positiv auf das Ertragsniveau aus, das nach Untersuchungen von DURAN (1990) mit späteren Saatzeitpunkten sinkt.

Auch für den Nährstofftransport und vor allem für die Anreicherung von Salzen im Oberboden ist die Richtung des Bodenwasserflusses von Bedeutung. Bei den Hochbeeten waren die Natriumkonzentrationen im Boden zwar gering, bzw. der ESP - Wert $< 10 \%$, und die Werte der elektrischen Leitfähigkeit niedrig (Tab. 3 und 10), so daß keine Anreicherung durch kapillaren Aufstieg droht, im zeitlichen Verlauf jedoch zeigten die Hochbeete tendenziell Zunahmen (Abb. 11).

Die zum Ende der Vegetationszeit teilweise aufwärts gerichtete Bodenwasserbewegung auf den konventionellen Feldern (vgl. 4.3.3) war vermutlich auf den intensiveren Entzug durch die Bitterkartoffeln bei der Knollenbildung (Verdunstung) zum Ende des Vegetationszyklus

zurückzuführen (VACHER et al. 1991), der der sonst nach unten gerichteten Bodenwasserbewegung entgegenwirkte.

Da eine abwärts gerichtete Bodenwasserbewegung in den Hochbeeten ausschließlich auf der westlichen Seite von Hochbeet 4 (Abb. 7) nachgewiesen wurde, ist als Ursache die starke Sonneneinstrahlung zu sehen, der die westliche Seite ab mittags ausgesetzt war, so daß von seitlicher Bodenevaporation ausgegangen werden kann.

5.4 Bodennährstoffgehalte

5.4.1 Bewertung nach Grenzwerten und zeitliche Entwicklung der bodenchemischen Parameter in den Systemen

Laut FAO (1985, S.143) ist bei Leitfähigkeitswerten bis $2,6 \text{ mS cm}^{-1}$ mit 10 % Ertragseinbußen zu rechnen. Werte von bis zu $1,4 \text{ mS cm}^{-1}$ (Tab. 3) in den Hochbeeten wiesen auf eine Ertragsgefährdung in diesem System hin, während auf den konventionellen Feldern mit maximal $0,5 \text{ mS cm}^{-1}$ (Tab. 3) keine Gefährdung des Kartoffelanbaus durch Versalzung auftrat. Auch andere auf den Hochbeeten angebaute Nutzpflanzen, wie Ackerbohnen, Zwiebeln (bis $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$) und andere Gemüsearten, die unter den Standortbedingungen des Altiplanos sonst nur in Gewächshäusern angebaut werden können, weisen einen geringen Salztoleranzbereich auf. Der Vorteil, den die Hochbeete hinsichtlich der Temperatur- und Wasserversorgungsbedingungen boten, ist also durch Versalzung gefährdet.

Der zeitliche Verlauf (Z 1 bis Z 2) der Leitfähigkeitswerte zeigte, das die Versalzungsgefahr in den Hochbeeten tendenziell höher als in den konventionellen Feldern war: die Hochbeete wiesen im zeitlichen Verlauf zwar eine stärkere Abnahme der Leitfähigkeit im Oberboden auf als die konventionellen Felder, im Unterboden jedoch stieg die Leitfähigkeit während der Trockenzeit (Z 2 bis Z 3) stärker an als in den konventionellen Feldern, in denen sie gleich blieb (Abb. 11). Zu Beginn der zweiten Vegetationszeit lagen die EL – Werte in den Hochbeeten höher als zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Z 1), so daß langfristig mit einem Anstieg der EL und einer Akkumulierung von Salzen in den Hochbeeten gerechnet werden muß. Auf den konventionell bewirtschafteten Feldern hingegen sanken die Leitfähigkeitswerte zu Beginn der zweiten Vegetationszeit wieder ab, eine langfristige Versalzungsgefahr war also nicht gegeben.

Die Ursache für die Abnahme der Leitfähigkeit waren häufige Niederschläge während der Vegetationszeit, die z.T. hoch und intensiv waren (Abb. 6). Diese wirkten der aufwärts gerichteten Bodenwasserbewegung im Boden der Hochbeete (Abb. 10) und der Bodenevaporation entgegen und verhinderten so eine Akkumulation von Salzen im Oberboden. In trockenen Jahren, wie 1997 / 98 können durch die fehlende Auswaschung Versalzungsprobleme entstehen. MORALES et al. (1997, S.77) stellten während der Vegetationszeit gleichbleibende Leitfähigkeiten in den Hochbeeten fest.

Hinsichtlich der Versalzungsproblematik erfolgte ebenfalls eine Analyse des Bewässerungswassers der Hochbeetkanäle. Die Mehrzahl der Proben (Tab. 10) fiel in die Klasse C 2, d.h. mittlere Leitfähigkeiten von $0,25 - 0,75 \text{ mS cm}^{-1}$ und einem vergleichbaren Salzgehalt von

160 - 480 mg l⁻¹. Damit war das Wasser geeignet für Pflanzen mit mäßiger Salzverträglichkeit bei ausreichender Auswaschung des Bodens. Die übrigen Proben fielen mit Leitfähigkeiten von 0 – 0,25 mS cm⁻¹ in die Güteklasse C 1, wodurch geringe Schädigungen der Pflanzen möglich waren (ACHTNICH 1980, S.110ff., RICHARDS 1962).

Die Na⁺ - Konzentrationen geben Hinweis auf die Gefährdung zur Bodenverschlammung. Der ESP - Wert stellt den prozentualen Anteil der Na⁺ - Belegung an der Kationenaustauschkapazität KAK dar. Er kennzeichnet die Schädigung im Boden durch Na⁺, die vor allem in einer Verschlechterung der physikalischen Bodeneigenschaften besteht. Böden mit ESP - Werten von unter 10 % gelten als nicht natrifiziert (nonsodic), bei Werten von 10 – 20 % liegt leichte Natrifizierung vor (FAO (1985, S.146).

Signifikante Unterschiede in den Natriumkonzentrationen der Böden der beiden Systeme konnten durch die vorliegenden Ergebnisse nicht nachgewiesen werden (Tab. 3). Die Gefahr einer Bodenverschlammung durch Na⁺ war nicht gegeben, weil die auftretenden ESP - Werte im Ober- und Unterboden der beiden Systeme zu allen drei Zeitpunkten unter 10 % lagen (Tab. 3). Eine Ausnahme bildeten die Hochbeete mit 10,8 % zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) 1998 / 99 (Tab. 3).

Im Hinblick auf die vorliegenden Ergebnisse war die Gefahr einer Schädigung durch Na⁺ bei den Hochbeeten tendenziell langfristig höher, weil die Natriumgehalte von Beginn bis zum Ende der ersten (Z 1 bis Z 2) und bis zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) anstiegen. Von 1 auf 5,1 cmol (+) / kg im Oberboden und von 0,6 auf 4,4 cmol (+) / kg im Unterboden (Tab. 3). Bei den konventionellen Felder stiegen die Natriumkonzentrationen von Z 1 zu Z 2 im Oberboden um den Faktor 4,6 stärker an als bei den Hochbeeten (2,8 cmol (+) / kg), verringerten sich aber während der Trockenzeit (von Z 2 auf Z 3) um 0,8 im Ober- und um 1 cmol (+) / kg im Unterboden (Tab. 3). In diesem Zusammenhang war der hohe Vorrat an org. Substanz im Unterboden der Hochbeete (Tab. 11) als günstig zu beurteilen, weil er durch das Schaffen von Austauscherplätzen die Na⁺ - Ionen im Boden binden konnte.

Zur Kennzeichnung des Bewässerungswassers hinsichtlich der Na⁺ - Konzentrationen wurde der SAR - Wert (Sodium Absorption Ratio) herangezogen (Tab. 10). Sämtliche in dieser Arbeit analysierten Wasserproben fielen in die Güteklasse S 1 (SAR - Wert: 0 - 10 und EL: 0,1 - 0,25 mS cm⁻¹), das heißt es können geringe Schädigungen durch Natrium aufgetreten sein (RICHARDS 1962, ACHTNICH 1980, S.116). Das Wasser war somit jedoch zur Bewässerung nahezu aller Bodenarten geeignet (keine Gefahr der Verschlammung) und die Gefahr der Entwicklung gefährlicher Konzentrationen von austauschbarem Natrium war gering.

Die mittelfristige Versorgung mit austauschbarem Mg²⁺ war mit Gehalten von >0,5 cmol (+) / kg im Boden in beiden Systemen als sehr gut zu bewerten (LANDON 1992, S.125). Die Gehalte der austauschbaren Kationen kennzeichnen die mittelfristige Versorgung (während der Vegetationsperiode) mit Nährstoffen, weil durch das Extraktionsmittel Ammoniumacetat NH₄⁺ac., die leicht austauschbaren, an Bodenkolloide gebundenen Nährstoffe, erfaßt werden (SCHLICHTING et al. 1995, S.248).

Abnehmende Mg^{2+} - Verfügbarkeit durch Nährstoffantagonismen zwischen Ca^{2+} und Mg^{2+} , ausgedrückt durch die $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ Verhältnisse, spielten zu Beginn der 1. Vegetationszeit (Z 1) eine Rolle. Steigt das Verhältnis über 5 : 1, nimmt die Magnesiumverfügbarkeit ab. Bei den Hochbeeten wurde die Mg^{2+} - Verfügbarkeit stärker im Oberboden (9,4 : 1), bei den konventionellen Feldern mit (12 : 1) stärker im Unterboden eingeschränkt (Tab. 4).

Im Bewässerungswasser der Hochbeete lag der Mg^{2+} - Quotient stets unter 50 (Ausnahme: Ende Kanal 3 mit 63, (Tab. 10)). Schädigungen des Pflanzenwachstums durch den Magnesiumgehalt, dies ist der Fall wenn der Quotient über 50 liegt (ACHTNICH 1980, S.115), traten somit vermutlich nicht auf.

Die Nährstoffnachlieferung mit austauschbarem Ca^{2+} während der Vegetationszeit war bei den Hochbeeten aufgrund des stärkeren Anstiegs der Konzentrationen im Ober- und Unterboden günstiger als im konventionellen System (Abb. 12, Z 1 bis Z 2) zu beurteilen. Ca^{2+} erhöht die Bodenfruchtbarkeit, indem es die Aktivität der Mikroorganismen und die Krümelstruktur des Bodens günstig beeinflusst. Die Bodenfruchtbarkeit der Hochbeete ähnelte in dieser Beziehung der des Bodentyps Schwarzerde, der durch die 70 % tige Sättigung des Austauschers mit Calcium besonders fruchtbar ist. Nützlich war das vor allem für die angebauten Leguminosen, z.B. Ackerbohnen (*Vicia faba*), da deren Ca^{2+} - Bedarf besonders hoch ist (MENGEL 1991, S.355). Das stärkere Ansteigen der Ca^{2+} - Konzentrationen im Hochbeetsystem während der Vegetationszeit könnte durch kontinuierliche Austauschprozesse erklärt werden, weil die org. Substanz im Oberboden der Hochbeete ebenfalls zunahm (Abb. 13), und damit die Austauscherplätze als „Quelle“ von Ca^{2+} . Zusätzlich wurden, durch die nach oben gerichtete Bodenwasserbewegung (Abb. 10), die im Bodenwasser gelösten Ca^{2+} - Kationen in den Oberboden transportiert. Auch die Lösung des in den Hochbeeten vorhandenen $CaCO_3$, kann zum Anstieg der Calciumkonzentrationen beigetragen haben. Eine Erhöhung der Ca^{2+} - Konzentrationen durch das Bewässerungswasser kann ausgeschlossen werden, da es im Verlauf der 5 Kanäle mit wenigen Ausnahmen: Kanal 10 von der Mitte zum Ende, und Kanal 8 und 4 vom Anfang zur Mitte hin, zunahm (Tab. 10). In der darauffolgenden Trockenzeit wurden im Ober- und Unterboden der Hochbeete eine deutlichere Abnahme der Ca^{2+} - Konzentrationen festgestellt als im konventionellen System (Abb. 12, Z 2 bis Z 3). So war zwar langfristig bei den Hochbeeten mit einer Verringerung an austauschbarem Ca^{2+} zu rechnen, da die Vorräte jedoch wesentlich höher als bei den konventionellen Feldern (Tab. 11) waren, war dieses von untergeordneter Bedeutung.

Zu Beginn der 2. Vegetationszeit wurde die Ca^{2+} - Verfügbarkeit eingeschränkt, was aus $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ Verhältnissen von unter 1:1 abgeleitet wurde (LANDON 1992, S.134). Im Ober- und Unterboden der konventionellen Felder stärker mit Verhältnissen von 0,5 bzw. 0,4: 1 als in den Hochbeeten mit 0,9 und 1:1 (Tab. 4).

In den Hochbeeten waren die Vorräte an pflanzenverfügbarem Ca^{2+} im Ober- und Unterboden mit 11 094 und 12 538 $kg\ ha^{-1}$ (Tab. 6) nach Tab. 17 als sehr hoch einzustufen, im konventionellen System lagen sie mit 4473 im Ober- und 3816 $kg\ ha^{-1}$ im Unterboden immerhin im hohen Bereich.

Beide Systeme waren ab dem Ende von Vegetationszeit 1 (Z 2) im Ober- und Unterboden optimal mit austauschbarem Kalium versorgt. Die Konzentrationen waren $> 0,8$ cmol (+) / kg Boden (Tab. 3), was als hoch eingestuft wird (LANDON 1992, S.126). Zu Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) lagen die Konzentrationen im Unterboden mit 2,8 bei den Hochbeeten und 3,6 cmol (+) / kg Boden bei den konventionellen Feldern höher als zum Ende der ersten Vegetationszeit (Z 2) mit 1,5 und 1,3 cmol (+) / kg Boden (Tab. 3), was auf eine langfristige Nachlieferung an K^+ hindeutete.

Tab. 14: Indirekte Bewertung des Gehaltes an org. Substanz (Walkley & Black) durch $C_{org.}$ und Bewertung von Gesamtstickstoff (Kjeldahl) nach LANDON (1992, S.138)

Gehalt an $C_{org.}$	Bewertung	Gehalt an N_{gesamt}	Bewertung
(%)		(%)	
> 20	sehr hoch	> 1	sehr hoch
10 - 20	hoch	0,5 - 1	hoch
4 - 10	mittel	0,2 - 0,5	mittel
2 - 4	niedrig	0,1 - 0,2	niedrig
< 2	sehr niedrig	$< 0,1$	sehr niedrig

Im Oberboden lagen die Gehalte an organischem Kohlenstoff, und daraus abgeleitet die organische Substanz in beiden Systemen zu den drei Zeitpunkten mit 2,4; 3,4 und 2,3 % bei den Hochbeeten und 2,0; 2,1 und 2,4 % C_{org} in den konventionellen Feldern im niedrigen Bereich (Tab. 12, Tab. 3). Unterschiede zwischen den Systemen zeigten sich vor allem im Unterboden: Zu Beginn der Vegetationszeit 1997 / 98 (Z 1) wurden in den Hochbeeten mit 4,0 % C_{org} (Tab. 3) Gehalte im mittleren Bereich, zum Ende und zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 2 und 3) mit 3,0 und 3,6 % C_{org} (Tab. 3) Gehalte an der oberen Grenze des niedrigen Bereichs festgestellt, während sie in den konventionellen Feldern mit 1,5; 1,2 und 1,3 % C_{org} zu allen drei Zeitpunkten sehr niedrig waren (Tab. 12).

Da Kartoffeln eher noch als andere Hackfrüchte zur Wurzelentwicklung und Knollenbildung eine lockere Bodenstruktur benötigen (FINCK 1979, S.308), die durch die organische Substanz geschaffen wird, wirkten sich die höheren Gehalte im Boden der Hochbeete auch in dieser Hinsicht positiv aus. Außerdem bedeutet eine Zunahme der organischen Substanz, z.B. im Oberboden der Hochbeete (Abb. 13), eine Zunahme an Austauschplätzen, wodurch das Nährstoffspeichervermögen des Bodens steigt. Desweiteren wird der Lufthaushalt der Hochbeete verbessert, da sich die org. Substanz stark auf die Bildung und Stabilität eines grobporigen Aggregatgefüges auswirkt (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S.70). Bei den konventionellen Feldern entfiel durch die niedrigen Gehalte an org. Substanz dieser Vorteil, obwohl er sich besonders im 2. Horizont, im Bereich der Korngröße U_t (Abb. 1 b) günstig auswirken würde.

Die scheinbare Zunahme im Oberboden der Hochbeete von 4,2 auf 5,9 % (Tab. 3) könnte auch mit der großräumigen Variabilität der Werte begründet werden. Der Anstieg mit 1,7 %

lag im Bereich der kleinräumigen Schwankung der Gehalte an org. Substanz im Oberboden der Hochbeete von 2,7 bis 5,9 % (Tab. 8). Eine Zunahme durch die Zufuhr von organischem Dünger erscheint fraglich, da MORALES et al. (1998) nicht beweisen konnten, daß zwischen den Düngungsstufen (max. 20 t ha⁻¹) und dem Gehalt an organischer Substanz ein Zusammenhang besteht.

Die Abnahme der organischen Substanz im Unterboden bei den Hochbeeten im Zeitraum von Z 1 bis Z 2 war möglicherweise auf höhere Zersetzungsgrade in dieser Bodenschicht zurückzuführen (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S. 51). Die Temperaturen im Unterboden der Hochbeete waren höher (Abb. 3 b und Abb. 4 b) und durch die Form der Hochbeete erfolgte eine stärkere Erwärmung als im konventionellen System. Dies verbesserte die Lebensbedingungen für Mikroorganismen und förderte damit den Abbau der org. Substanz. Das leichte Ansteigen im Unterboden während der Trockenzeit kann durch das verbleibende Kartoffelblatt erklärt werden, das nach der Ernte manuell untergepflügt wurde und nur langsam mineralisiert wird. Die höheren C_{org.}- Gehalte im Unterboden können durch generell höhere Gehalte an organischer Substanz in Unterböden in redoximorpher Böden erklärt werden (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S.51). Bei den Hochbeeten begann bereits bei 20 cm der durchmischte Horizont (Oxidations - und Reduktionsverhältnisse), so daß die stärkere Zersetzung der unteren Schichten nach oben transportiert wurde. Bei den konventionellen Feldern befand sich in dieser Tiefe der Oxidationshorizont (Abb. 1 a und b). Durch die hohe Konzentration an organischer Substanz im Unterboden der Hochbeete mit 6,9 % (Z 1, Tab. 3) läßt sich auch die hohe Konzentration an austauschbar gebundenen basischen Kationen, Ca²⁺ und Mg²⁺, mit 55,4 und 6,6 cmol (+) kg⁻¹ im Unterboden der Hochbeete gegenüber 29,4 und 2,4 cmol (+) kg⁻¹ im Unterboden des konventionellen Anbaus erklären.

Die Konzentrationen an Gesamtstickstoff lagen zu allen drei Zeitpunkten bei den Hochbeeten und im konventionellen System im Ober- und Unterboden unter 0,5 % (Tab. 3) und damit im mittleren Bereich (Tab. 12). Bei den konventionellen Feldern lagen die Konzentrationen zu allen drei Zeitpunkten im Ober- und Unterboden mit 0,2 % (Tab. 3) bereits an der unteren Grenze des mittleren Bereichs (Tab. 12), während sie in den Hochbeeten jeweils zu Beginn der Vegetationszeiten (Z 1 und Z 3) mit 0,4 % (Tab. 3) an der oberen Grenze des mittleren Bereichs lagen (Tab. 12).

Tab. 15: Bewertung der Phosphorkonzentrationen (Olsen) durch Grenzwerte nach verschiedenen Autoren

	Phosphor		
	mg kg ⁻¹ Boden		
	Niedrig	Mittel	Hoch
PAGEL (1982, S.106)	0 - 10	10 - 20	20 - 30
LANDON (1992, S.135)	< 5	5 - 15	> 15
FAO (1985, S.137)	< 5	6 - 10	> 11
ROWELL (1997, S.368)	0 - 9	10 - 15	16 - 25

Die Grenzwerte für die Methode Olsen sind als Orientierungswerte aufzufassen. Sie bedeuten, daß bei niedrigem P - Gehalt im Boden, eine P - Düngung mit hoher Wahrscheinlichkeit notwendig und effektiv sein wird, während bei einem hohen P - Gehalt, eine P - Düngung kaum ertragswirksam wird (PAGEL 1982, S.106).

Nach PAGEL, der die Grenzwerte etwas höher ansetzt, bestand vor allem bei den konventionellen Feldern Düngungsbedarf. Die Phosphorkonzentrationen (Tab. 3) lagen generell im niedrigen Bereich von 0 – 10 mg kg⁻¹ Boden (Tab. 15), lediglich zum 3. Zeitpunkt im Oberboden mit 16,8 mg kg⁻¹ (Tab. 3) waren sie im mittleren Bereich (Tab. 15) angesiedelt. Bei den Hochbeeten dagegen lagen die P – Konzentrationen (Tab. 3) generell im mittleren Bereich von 10-20 mg kg⁻¹, und stiegen zum Ende der ersten Vegetationszeit (Z 2) im Oberboden mit 23,4 mg kg⁻¹ sogar in den hohen Bereich von 20 – 30 mg kg⁻¹ an (Tab. 15).

Nach den Grenzwerten von LANDON (Tab. 15) war im konventionellen Anbau der Unterboden P - düngungsbedürftig mit 4,4; 5,6; und 5,3 mg kg⁻¹ (Tab. 3), im Oberboden lagen die P – Gehalte mit 9,4 (Z 1) und 11,1 (Z 2) im mittleren Bereich von 5 – 15 mg kg⁻¹ (Tab. 15). Bei den Hochbeeten waren die P - Konzentrationen zu allen drei Zeitpunkten mit 12,4; 23,4 und 17,4 im Ober- und 15,9; 15,3 und 16,8 mg kg⁻¹ im Unterboden hoch (Tab. 3), sowohl nach den Grenzwerten von LANDON als auch nach der FAO, d.h. > 15 bzw. 11 mg kg⁻¹ (Tab. 15), so daß für eine P - Düngung keine Notwendigkeit bestand.

In beiden Systemen kam es mit Ca²⁺ : Mg²⁺ Verhältnissen < 3 : 1 zu eingeschränkter Phosphorverfügbarkeit (LANDON 1992, S.134). Zum Ende der 1. Vegetationszeit (Z 2) leicht, mit Ca²⁺ : Mg²⁺ Verhältnissen von 2 : 1 im Ober- und Unterboden im konventionellen System und 2,3 : 1 im Oberboden der Hochbeete (Tab. 4), zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) etwas stärker, vor allem bei den konventionellen Feldern mit 0,5 und 0,4 : 1 im Ober- und Unterboden (Tab. 4), was sich zum dritten Zeitpunkt vorwiegend bei den konventionellen Feldern negativ ausgewirkt haben könnte.

Tab. 16: Phosphoransprüche verschiedener Nutzpflanzen (LANDON 1992)

Charakteristischer Phosphoranspruch der Nutzpflanze	Nutzpflanze	Phosphor mg kg ⁻¹		
		defizitär	mittel	angemessen
Hoher Bedarf an P	Kartoffel	< 11	12 - 20	> 21
Geringer Bedarf an P	Getreide	< 4	5 - 7	> 8

Die P - Konzentration in den Böden der Hochbeete waren im Hinblick auf die Nährstoffansprüche der Kartoffeln zu allen drei Zeitpunkten mit 12,4 (Z 1) und 17,4 (Z 3) mg kg⁻¹ im Ober- und 15,9; 15,3 und 16,8 im Unterboden (Tab. 3) als mittelmäßig zu beurteilen (Tab. 14). Nur im Oberboden zum 2. Zeitpunkt war die Versorgung mit 23,4 mg kg⁻¹ angemessen, d.h. > 21 mg kg⁻¹ (Tab. 14). Bei den konventionellen Feldern war die P – Konzentration für Kartoffeln im Unterboden zu allen drei Zeitpunkten < 11 mg kg⁻¹

(Tab. 3) und damit defizitär (Tab. 14). Sie steigt nur zum Ende der ersten (Z 2) und zum Beginn der zweiten Vegetationszeit (Z 3) mit 11,1 und 16,8 mg kg⁻¹ im Oberboden (Tab. 3) in den mittleren Bereich von 12 bis 20 mg kg⁻¹ (Tab. 14) an.

Die Pflanzen nehmen die zum Wachstum erforderlichen Phosphat – Ionen vorwiegend aus der Bodenlösung auf. Die Konzentration in der Bodenlösung ist jedoch häufig sehr gering, und die P - Menge reicht nicht aus, den P - Bedarf der Pflanze während der gesamten Wachstumszeit zu decken. Deshalb haben andere P - Formen (sorbierte; Teile der fixierten Phosphate), die mit der P - Konzentration der Bodenlösung im Gleichgewicht stehen, eine große Bedeutung (PAGEL 1982, S.106). Im vorliegenden Fall war dies insbesondere die organische Substanz in den Hochbeeten, in der die Phosphate fixiert vorliegen (Tab. 3).

Weiterhin nimmt die biochemische Aktivität im Boden mit steigenden Bodentemperaturen zu (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S. 81). Die mittleren Minimumtemperaturen in 10 cm Bodentiefe waren in den Hochbeeten höher als bei den konventionellen Feldern. Sie nahmen zu Beginn der Vegetationszeit zu und waren gegen Ende gleichbleibend (Abb. 4 a). Auch die monatliche Maximaltemperatur in 10 cm Bodentiefe lag in den Hochbeeten vor allem zu Beginn über der des konventionellen Systems (Abb. 4 a). Die relativ hohen Bodentemperaturen bewirkten somit vermutlich höhere mikrobielle Aktivitäten in den Hochbeeten und damit eine verstärkte Mineralisierung der org. Substanz und entsprechend steigenden Phosphorgehalten.

Die Durchwurzelung der Hochbeete war stärker als die der konventionell bewirtschafteten Felder (Tab. 1 a). Infolge dessen kann von einer höheren Besiedlungsdichte mit Mikroorganismen ausgegangen werden, die die Umsetzung organischer P - Verbindungen bewirken, da an der Wurzeloberfläche und in der gesamten Rhizosphäre deren Biomasse viel höher ist als im wurzelfernen Boden (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL 1992, S.226). Die in der zeitlichen Entwicklung zunehmende Phosphatkonzentration könnte daraus folgend z.T. auf die Zunahme der Wurzelmasse und der dadurch steigenden mikrobiellen Aktivität (Abb. 13 und 14) zurückzuführen sein.

Eine weitere P – Quelle stellten die Fe - Oxide dar, aus denen im reduzierenden Milieu der Hochbeete (Tab. 1 a) Phosphat freigesetzt werden kann. Die generell geringe Verfügbarkeit von Phosphor in Gleyen, durch den mechanischen P - Einschluß in Fe – Oxiden und die dadurch auftretende starke P – Fixierung und die starke P - Bindung an Fe – Oxide (SCHEFFER / SCHACHTSCHABEL, S.427), wirkt sich also speziell bei den Hochbeeten weniger negativ aus.

Die Parameter Phosphor (Olsen) und organische Substanz unterschieden im zeitlichen Verlauf die Systeme deutlich und zeigten in den Hochbeeten eine höhere Dynamik (Abb. 13 und 14), wogegen die Verläufe der elektrischen Leitfähigkeit und Ca²⁺ in beiden Systemen ähnlich waren (Abb. 11 und 12).

Tab. 17: Bewertung pflanzenverfügbarer Nährstoffvorräte in kg ha^{-1} (SCHLICHTING et al. 1995, S.250)

	sehr gering	gering	mittel	erhöht	hoch	sehr hoch
	kg ha^{-1}					
K^+	80	240	480	800	1200	
Ca^{2+}	150	500	1000	2000	6000	

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium waren vor allem im konventionellen System gering, d.h. $< 240 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tab. 15). Die Vorräte lagen im Oberboden bei 205, im Unterboden bei 177 kg ha^{-1} (Tab. 6). Bei den Hochbeeten lagen sie mit 295 und 278 kg ha^{-1} an der unteren Grenze des mittleren Bereichs mit $< 480 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tab. 15). Die durch diese Methode erfaßten Nährstoffe zeigen die mittelfristige Nährstoffverfügbarkeit an, weil nicht die gelösten, sondern die an Bodenkolloide leicht austauschbar gebundenen Nährstoffe erfaßt werden (SCHLICHTING et al. 1995). Mittelfristig (während der Vegetationszeit) könnte K^+ also zum limitierenden Faktor werden, weil der pflanzenverfügbare Anteil gering war. Die Vorräte an stärker gebundenem Kalium, erfaßt durch Extraktion mit $\text{NH}_4^+\text{ac.}$, waren wesentlich höher, aber nur langfristig pflanzenverfügbar.

Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, wiesen die Hochbeete deutlich höhere Nährstoffkonzentrationen im Unterboden auf als das konventionelle System. Dieser Sachverhalt ist vermutlich auf die Konstruktionsweise der Hochbeete zurückzuführen, bei der der nährstoffreichere, mit dem Sumpfgas Totorilla (*Scirpus rigidus*) bewachsene, Oberboden in tiefere Schichten verlagert wurde.

Durch geeignete Bodenbearbeitungsmaßnahmen wie Gründüngung und Mulchen ließe sich vermutlich auch im Unterboden des konventionellen Systems eine Verbesserung der Nährstoffsituation, vor allem im Hinblick auf den Gehalt an Stickstoff und organischer Substanz erzielen.

Die in dieser Arbeit festgestellten Nährstoffgehalte in den Böden der beiden Systeme wurden durch lokale Nährstoffuntersuchungen eingeordnet. Um eine Spannweite der Nährstoffkonzentrationen zu erhalten, wurden in Tabelle 18 vorwiegend Messungen erwähnt, deren Ergebnisse höher oder niedriger lagen, als die in der vorliegenden Arbeit gemessenen Nährstoffkonzentrationen. Die untersuchten Flächen in Tabelle 18 befanden sich in der Nähe des Untersuchungsgebietes und lagen ebenfalls in unmittelbarer Seenähe, so daß ein Vergleich möglich war. Erfolgt in den Arbeiten keine Angaben über den Zeitpunkt der Entnahme der Proben, wurden die Werte mit dem ersten Zeitpunkt Z 1 (Saat) in der vorliegenden Arbeit verglichen (Tab. 3).

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor (Olsen) im Oberboden lagen in der vorliegenden Arbeit mit $12,4 \text{ mg kg}^{-1}$ in den Hochbeeten und $9,4 \text{ mg kg}^{-1}$ in den konventionellen Feldern zu Beginn der ersten Vegetationszeit (Tab. 3) in der gleichen Größenordnung wie von MIRANDA (1998) festgestellte Konzentrationen von 12,2 in Hochbeeten und 10 mg kg^{-1} im konventionellen System (Tab. 18). Dagegen waren die Werte in der vorliegenden Arbeit mit $12,4$ und $23,4 \text{ mg kg}^{-1}$ zur Saat (Z 1) und zur Ernte (Z 2, Tab.

3) im Oberboden der Hochbeete deutlich höher als von (ZURITA 1997) festgestellte Werte von 8 und 9 mg kg⁻¹ in 0-15 cm Bodentiefe zur Saat und zur Ernte (Tab. 18) auf Hochbeeten unter Fruchtfolge in Llojllata. Die Konzentration der vorliegenden Arbeit zur Saat (Z 1, Tab. 3) war mit 12,4 mg kg⁻¹ im Oberboden der Hochbeete jedoch gering verglichen mit Konzentrationen in Achuta Grande von 23,6 mg kg⁻¹ in 0-15 cm Tiefe zur Saat in Hochbeeten mit Monokultur (Tab. 18). Die Gehalte der vorliegenden Arbeit im Unterboden der Hochbeete mit Konzentrationen von 15,9 und 15,3 mg kg⁻¹ P (Olsen) zur Saat und zur Ernte (Z 1, 2, Tab. 3) lagen vergleichsweise niedrig verglichen mit Werten von 30,9 und 22,9 mg kg⁻¹ P (Olsen) zu denselben Zeitpunkten im Unterboden (15-30 cm) von Hochbeeten in Achuta Grande unter Monokultur (Tab. 18). Bei einem Vergleich mit Werten von 6,0 und 5,7 mg kg⁻¹ P (Tab. 18) in Llojllata zu diesen Zeitpunkten waren die Gehalte der vorliegenden Arbeit mit 15,9 und 15,3 mg kg⁻¹ P (Olsen) relativ hoch.

Die Kaliumgehalte im Oberboden in der vorliegenden Arbeit betragen zur Saat (Z 1) 0,5 cmol (+) / kg⁻¹ in den Hochbeeten und 0,3 cmol (+) / kg⁻¹ im konventionellen System (Tab. 3) und lagen damit unter den Messungen von MIRANDA (1998) mit 1,2 cmol (+) / kg⁻¹ auf Hochbeeten und 0,9 cmol (+) / kg⁻¹ im konventionellen System (Tab. 18). Höhere Gehalte als in dieser Arbeit wurden im Ober (0-15 cm)- und Unterboden (15-30 cm) von Hochbeeten (Monokultur) zur Saat und im Unterboden zur Ernte in Achuta Grande festgestellt. Diese Kaliumkonzentrationen lagen in der vorliegenden Arbeit mit gemessenen Werten in den Hochbeeten von 0,5 (Oberboden Z 1); 0,5 (Unterboden Z 1) und 1,5 cmol (+) / kg⁻¹ (Unterboden Z 2, Tab. 3) deutlich unter den Werten von 1,5; 1,8 und 1,9 cmol (+) / kg⁻¹ zu diesen Zeitpunkten (Tab. 18). Während sie mit 1,8 und 1,5 cmol (+) / kg⁻¹ Kalium im Ober- und Unterboden der Hochbeete zur Saat (Z 2, Tab. 3) verglichen mit Konzentrationen in Hochbeeten in Llojllata von nur 0,5 und 0,7 cmol (+) / kg⁻¹ deutlich höher lagen (Tab. 18).

Die Konzentrationen von organischem Kohlenstoff C_{org.} im Oberboden der Hochbeete zur Saat (Z 1) mit 2,4 % waren deutlich niedriger als von MIRANDA (1998) in Catacora gemessene Werte von 5,4 % (Tab. 18), in den konventionellen Feldern lagen mit 2,0 % zum selben Zeitpunkt (Tab. 3) die Werte deutlich höher als 0,3 %. In der vorliegenden Arbeit waren die Gehalte im Unterboden der konventionellen Felder zur Saat (Z 1) mit 1,5 % (Tab. 3) höher als Werte von 0,8 % in konventionell bewirtschafteten Feldern in Achacachi (Tab. 18). Niedrigere Werte als in der vorliegenden Arbeit mit 2,4 und 3,4 % im Oberboden der Hochbeete zur Saat (Z 1) und zur Ernte (Z 2) und mit 2,0 % zur Saat im konventionellen System (Tab. 3) wurden mit je 1,3 % in Hochbeeten in Achacachi und mit 1,0 % im konventionellen System in Chucara festgestellt (Tab. 18).

Die organische Substanz im Oberboden der Hochbeete mit 4,2 % (Tab. 3) war deutlich höher als bei MORALES (1997) mit 2 %, im konventionellen System hingegen lagen die mittleren Gehalte mit 3,6 % (Tab. 3) geringfügig niedriger als bei MORALES (1997) festgestellte Werte von 4 % (Tab. 18). Dagegen waren die Konzentrationen der vorliegenden Arbeit mit 4,2 % (Tab. 3) im Oberboden der Hochbeete verglichen mit Werten von MORALES (1998), die auf

denselben Untersuchungsflächen wie in der vorliegenden Arbeit Werte bis 9 % (Tab. 18) feststellte, wesentlich niedriger.

Die Gesamtstickstoffgehalte im Oberboden der Hochbeete und konventionellen Felder mit 0,3 bzw. 0,2 % (Z 1, Tab. 3) waren niedriger als bei MIRANDA (1998) mit 0,4 und 0,3 % (Tab. 18). Die Gehalte im Ober- und Unterboden der konventionellen Felder mit jeweils 0,2 % zur Saat (Z 1, Tab. 3) waren in der vorliegenden Arbeit höher als in konventionell bewirtschafteten Feldern in Chucara und Achacachi mit je 0,1 % (Tab. 18). Auch in den Hochbeeten waren die Gehalte mit je 0,3 % im Oberboden zur Saat und Ernte (Tab. 3) höher als in Chucara mit Werten von 0,2 % zur Saat und 0,3 % zur Ernte (Tab. 18).

Die Konzentrationen an austauschbarem Ca^{2+} und Mg^{2+} waren in der vorliegenden Arbeit im Oberboden der Hochbeete und der konventionell bewirtschafteten Felder zur Saat (Z 1) und zur Ernte (Z 2) höher als von MORALES (1997) gemessene Werte (Tab. 18). Der deutlichste Unterschied trat mit $93,9 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ zur Ernte im Oberboden der Hochbeete (Tab. 3) auf gegenüber nur $8,7 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ auf Hochbeeten in Aygachi (Tab. 18). Die Na^{+} - Konzentrationen waren dagegen in der vorliegenden Arbeit im Oberboden beider Systeme deutlich geringer mit 1,6 zur Saat und $3,8 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ zur Ernte bei Hochbeeten (Tab. 3) gegenüber 17 und $31 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ (Tab. 18). Und mit 0,5 und $5,1 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ zu denselben Zeitpunkten im konventionellen System (Tab. 3) verglichen mit 2,7 und $13,8 \text{ cmol (+) / kg}^{-1}$ (Tab. 18).

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Parameter erweiternd, stellte SANCHEZ DE LOZADA (1997) fest, daß sich die Nitratverfügbarkeit (NO_3^-) durch die Konstruktion der Hochbeete erhöhte. Die Nitratgehalte im Oberboden der Hochbeete waren im Vergleich zum ursprünglichen Oberboden erhöht.

Das könnte ein Hinweis darauf sein, daß durch die Bodendurchmischung die Bodendurchlüftung erhöht und so durch vermehrte biologische Aktivität eine erhöhte Mineralisierung und folgender Nitrifikation des organisch gebundenen Stickstoffs angeregt wurde. Das würde die Erklärungen zu den ansteigenden Phosphorgehalten im Boden der Hochbeete bekräftigen.

Tab. 18: Zusammenstellung der Ergebnisse lokaler Nährstoffuntersuchungen auf Hochbeeten und in konventionellen Feldern anderer Autoren, eigene Ergebnisse siehe Tab. 3 (weitere Erklärungen im Text)

Parameter	Konzentrationen	Ort	Anbausystem	Zeit- raum	Bemer- kungen	Autor
Org. Substanz	bis zu 9 %	Batallas	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MORALES
	2 %	Aygachi	Hochbeete		"	(1998, S.29)
	4 %	Aygachi	Konventionell		"	MORALES (1997, S.82)
C _{org.}	5,4 %	Catacora	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MIRANDA
	0,3 %	Catacora	Konventionell	Saat	"	(1998, S.43)
	0,8 %	Achacachi	Konventionell	—	20-40 cm	SANCHEZ
	1,3 %	Achacachi	Hochbeete	Saat	0-20 cm	DE LOZADA
	1,3 %	Achacachi	Hochbeete	Ernte	"	(1996, S.115ff)
	1,0 %	Chucara	Konventionell	Saat	"	und S.127ff)
P (Olsen)	12,2 mg kg ⁻¹	Catacora	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MIRANDA
	10,0 mg kg ⁻¹	Catacora	Konventionell	Saat	"	(1998,S.43)
	*23,6 mg kg ⁻¹	Achuta Gra.	Hochbeete	Saat	0-15 cm	ZURITA
	*30,9 mg kg ⁻¹	Achuta	Hochbeete	Saat	15-30 cm	(1997, S. 104)
	*22,9 mg kg ⁻¹	Grande	Hochbeete	Ernte	"	°Frucht- folge
	°8,0 mg kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Saat	0-15 cm	"
	°8,9 mg kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Ernte	"	*Mono- kultur
	*6,0 mg kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Saat	15-30 cm	"
*5,7 mg kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Ernte	"	"	
K ⁺ (NH ₄ ⁺ ac.)	1,2 cmol (+) kg ⁻¹	Catacora	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MIRANDA
	0,9 cmol (+) kg ⁻¹	Catacora	Konventionell	Saat	"	(1998, S.43)
	*1,5 cmol (+) kg ⁻¹	Achuta Gra.	Hochbeete	Saat	0-15 cm	ZURITA
	*1,8 cmol (+) kg ⁻¹	Achuta	Hochbeete	Saat	15-30 cm	(1997, S. 104)
	*1,9 cmol (+) kg ⁻¹	Grande	Hochbeete	Ernte	"	°Fruchtfolge
	°0,5 cmol (+) kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Ernte	0-15 cm	*Monokultur
°0,7 cmol (+) kg ⁻¹	Llojllata	Hochbeete	Ernte	15-30 cm	"	
N _{gesamt}	0,4 %	Catacora	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MIRANDA
	0,3 %	Catacora	Konventionell	Saat	"	(1998, S.43)
	0,1 %	Achacachi	Konventionell	—	20-40 cm	SANCHEZ
	0,2 %	Chucara	Hochbeete	Saat	0-20 cm	DE LOZADA
	0,1 %	Chucara	Hochbeete	Ernte	"	(1996, S.115ff;
	0,1 %	Chucara	Konventionell	—	"	S.127ff)
Ca ²⁺ (NH ₄ ⁺ ac.)	8,5 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MORALES
	8,7 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Ernte	"	(1997)
	15 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Saat	"	"
	15 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Ernte	"	"
Mg ²⁺ (NH ₄ ⁺ ac.)	3,8 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MORALES
	3,8 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Ernte	"	(1997)
	8 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Saat	"	"
	8 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Ernte	"	"
Na ⁺ (NH ₄ ⁺ ac.)	17 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Saat	0-30 cm	MORALES
	31 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Hochbeete	Ernte	"	(1997)
	2,7 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Saat	"	"
	13,8 cmol (+) kg ⁻¹	Aygachi	Konventionell	Ernte	"	"

5.4.2 Räumliche Variabilität der Systeme

Bei der Bewertung der Nährstoffgehalte in den Böden der beiden Systeme muß berücksichtigt werden, das die Hochbeete im Vergleich zum konventionellen System eine größere Heterogenität in der Nährstoffverteilung aufwiesen (Tab. 8 und 9). Ursache hierfür war vermutlich u.a. die aufgrund der Bewässerungskanäle verhältnismäßig kleinräumige Hochbeetstruktur. Abhängig von der Entfernung zum Kanal variierten z. B. die Leitfähigkeiten. Sie waren im Randbereich der Hochbeete leicht erhöht (Tab. 8), verursacht wahrscheinlich durch die größere evaporierende Oberfläche. Die Leitfähigkeit als Summenparameter ist u.a. von der Konzentration der Kationen Mg^{2+} , Ca^{2+} und Na^+ abhängig. Am östlichen Rand der Hochbeete wurde insbesondere ein Ansteigen der Natriumkonzentrationen im Oberboden beobachtet, während an der Westseite auch Ca^{2+} und Mg^{2+} deutlich zunahmen. Die Gefahr der Versalzung, bzw. Verschlammung durch hohe Natriumkonzentrationen wäre im Randbereich der Hochbeete als besonders problematisch zu beurteilen (Gefügestabilität, Erosion). Ihr dürften jedoch die hohen Gehalte von Ca^{2+} und Mg^{2+} entgegenwirken, die dort gemessen wurden (Tab. 3).

Auf Hochbeeten in Aygachi, 10 km südlich von den in dieser Arbeit untersuchten Flächen, kamen MORALES et al. (1997) zu ähnlichen Ergebnissen. Die Konzentrationen der löslichen und extrahierbaren Kationen und die elektrische Leitfähigkeit zeigten eine große Variabilität auf kleinem Raum. MORALES et al. führten 1998 ebenfalls Untersuchungen auf den Untersuchungsflächen der vorliegenden Arbeit durch. Sie ermittelten Gehalte von 2 bis 3 % an organischer Substanz im Oberboden auf konventionellen Feldern, und von 3 bis zu 9 % auf Hochbeeten und bestätigten damit die größere Heterogenität in den Hochbeeten (Tab. 18). Auch SANCHEZ DE LOZADA (1997, S.125) bestätigte größere horizontale und vertikale Heterogenität in der Nährstoffverteilung in den Oberböden der Hochbeete gegenüber dem ursprünglichen Oberboden.

5.4.3 Bewertung der Nährstoffvorräte

Das in der vorliegenden Arbeit gemessene Ertragsniveau in beiden Systemen betrug 54 t ha^{-1} Knollengewicht (Tab. 12). Die Autoren in Tabelle 19 wurden gewählt, weil das Ertragsniveau ähnlich war. Die Nährstoffentzüge, der aufgeführten Erträge von normalen Kartoffeln an Standorten der USA und Europa, dürften also vergleichbar dem Anbau normaler Kartoffeln auf Hochbeeten sein. Das Kraut verblieb auf den Feldern, deswegen wurden in Tabelle 19 nur die Entzüge ohne Kraut (Autor 1 - 6) berücksichtigt.

Tab. 19: Zusammenstellung der Nährstoffentzüge (kg ha^{-1}) bei Kartoffelanbau nach verschiedenen Autoren (1 - 6 Knollengewichte, 7 - 9 Knollen und Kraut)

		Ertragshöhe	N_{gesamt}	P	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
			kg ha^{-1}				
1	FINCK (1979, S.308)	50 t ha^{-1}	150	30	—	6	12
2	IFA (1992, S.120 nach Anderson & Hewgill)	$57,9 \text{ t ha}^{-1}$	105	26	261	4	7,2
3	IFA (1992, S.120 nach COOKE 1972)	50 t ha^{-1}	80	25	199	7	9
4	IFA (1992, S.120 nach COOKE 1974)	50 t ha^{-1}	180	11	165	7	9
5	LINSER (1965, S.423)	50 t ha^{-1}	250	44	331	107	—
6	LINSER (1965, S.423)	50 t ha^{-1}	—	26	249	36	9
mittlerer Entzug (von 1 bis 6) bei einem Ertragsniveau (Knollen) von $50 - 60 \text{ t ha}^{-1}$			153	27	241	28	9,3
	LANDON (1992)	62 t ha^{-1} (ganze Pflanze)	147	19	—	—	—
	LINSER (1965, S.423)	50 t ha^{-1} (Knollen + Kraut)	—	31	415	—	—
	LINSER (1965, S.423)	50 t ha^{-1} (+3 t Kraut)	220	46	307	82	—

Die aus den Nährstoffkonzentrationen berechneten Nährstoffvorräte ergaben für beide Bodentiefen in den Hochbeeten deutlich höhere Nährstoffvorräte als bei den konventionell bewirtschafteten Feldern (Tab. 6 und Tab. 11).

Der große Vorrat an organischer Substanz im Unterboden der Hochbeete mit 155 t ha^{-1} gegenüber 56 t ha^{-1} im konventionellen System ist als langfristige Nährstoffquelle zu betrachten (Tab. 11). Er stellt die mobilisierbaren Reserven dar. Das sind die Gehalte an Nährstoffen, die durch stärkere Extraktionsverfahren erfaßt werden und erst über langfristige (mehrere Jahre) Zersetzungsprozesse im Boden verfügbar werden (SCHLICHTING et al. 1995, S.63).

Die Vorräte an N_{gesamt} im Unterboden der Hochbeete waren mit 9840 kg ha^{-1} als hoch einzustufen (SCHLICHTING et al. 1995, S.63). Im Ober- und Unterboden der konventionellen Felder, mit 4520 und 5080 kg ha^{-1} lagen die Gehalte dagegen im mittleren Bereich. Da die Werte der N_{gesamt} -Vorräte für ein gemäßigttes Klima (8°C , 700 mm Jahresniederschlag) gelten, dürfte aufgrund der kühl - arideren Bedingungen im Untersuchungsgebiet während der Vegetationszeit die tatsächliche auf Mineralisierung beruhende Nährstoffnachlieferung geringer ausfallen. Die Größenordnung der N_{gesamt} -Vorräte in den Böden beider Systeme lag im Bereich mitteleuropäischer Ackerböden (1000 bis 6000 kg ha^{-1}). In den Hochbeeten wurden sogar höhere Werte ermittelt: 7380 im Ober- und 9840 kg ha^{-1} im Unterboden (Tab. 11). Bei mittleren Entzügen von $153 \text{ kg } N_{\text{gesamt}} \text{ ha}^{-1}$ (Tab. 17) und einer Düngungszufuhr von $52 \text{ kg } N_{\text{gesamt}} \text{ ha}^{-1}$ (Tab. 11), also einem Entzug von ca. $100 \text{ kg } N_{\text{gesamt}} \text{ ha}^{-1}$, decken die Vorräte im Unterboden der Hochbeete Ernteentzüge für 98 Jahre, im konventionellen System für 50 Jahre. Da jedoch über 80 % von den N_{gesamt} -Vorräten festgelegt ist in komplexen organischen

Verbindungen (RICHTER 1992), ist der Anteil der Mikroben (heterotrophe aerobe / anaerobe) im Boden wichtig, die diese Verbindungen aufschließen können und den Abbau zu NH_4^+ bewirken. Die mikrobielle Aktivität, abgeleitet aus der Produktion von $\text{mg CO}_2 \text{ kg Boden}^{-1} \text{ h}^{-1}$, war im Oberboden (0 -20 cm) der Hochbeete höher als auf konventionellen Feldern (MIRANDA 1998). Auf den Hochbeeten ist also mit höheren Mineralisationsraten hinsichtlich des N_{gesamt} -Vorrates zu rechnen. Bei mitteleuropäischen Verhältnissen liegen die Mineralisationsraten in Ackerböden bei $10 - 250 \text{ kg N}_{\text{min}} \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ (RICHTER 1992). Vermutlich werden unter den Klimabedingungen der Hochebene (Altiplano) geringere Mineralisationsraten, etwa von $150 \text{ kg N}_{\text{min}} \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ erreicht, die den in Tabelle 19 genannten mittleren Entzug von $153 \text{ kg N}_{\text{gesamt}} \text{ ha}^{-1}$ bei dem Anbau von Kartoffeln noch decken würden.

Im Boden von Hochbeeten wurden neben Mikroorganismen, die den organisch gebundenen Stickstoff im Boden in mineralische N - Formen umwandeln und ihn so der Pflanze verfügbar machen, auch autotrophe Cyanobakterien (ungebundene biologische N_2 - Binder) gefunden, sowie der in Symbiose mit der Blaualge *Anabaena* lebende Wasserfarn *Azolla filiculoides* (symbiontischer biologischer N_2 - Binder). Beide machen den Luftstickstoff für die Pflanze verfügbar. Als wichtigster Stickstofffixierer importierte dieser Symbiosekomplex $2,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Tag}$, bzw. $912 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Jahr}$ in das System der Hochbeete (BIESBOER et al. 1999). Verluste durch Denitrifikation, bei der $\text{NO}_3 - \text{N}$ durch Mikroben zu $\text{N}_2 - \text{N}$ reduziert wird (FINCK 1991, S.86), die vermutlich aufgrund der reduzierten, anaeroben Bedingungen in den Hochbeeten auftreten können (Abb. 1 a), werden dadurch ausgeglichen.

Phosphor könnte bei Entzügen bis zu 44 kg ha^{-1} Entzug (durchschnittlich 30 kg ha^{-1} , Tab. 19) trotz einer Zufuhr von $7,5 \text{ kg ha}^{-1}$ durch Düngung zu einem limitierenden Faktor werden. Vor allem bei den konventionellen Feldern mit 38 kg ha^{-1} im Oberboden und 13 kg ha^{-1} im Unterboden können die Vorräte im Unterboden innerhalb einer, im Oberboden in der Hälfte der zweiten Vegetationszeit (30 kg ha^{-1} Entzug + $7,5 \text{ kg ha}^{-1}$ Düngung = $22,5 \text{ kg ha}^{-1}$ Entzug; 38 kg ha^{-1} im Oberboden / $22,5 \text{ kg ha}^{-1}$ Entzug = 1,6) aufgebraucht werden, während bei den Hochbeeten die Phosphorvorräte mit 43 kg ha^{-1} im Ober- und 41 kg ha^{-1} im Unterboden (Tab.11) Entzüge von $22,5 \text{ kg ha}^{-1}$ für fast zwei Vegetationszeiten deckten. Hier wirkt sich die höhere bodenbiologische Aktivität im Boden der Hochbeete (MIRANDA 1998) langfristig besonders vorteilhaft aus, weil dadurch während der Vegetationszeit zusätzlich durch die Bakterien org. gebundenes Phosphat freigesetzt wird.

Nährstoffzufuhr durch das Bewässerungswasser der Kanäle konnte mit Ausnahme von Ammonium in Kanal 4 (Tab. 10) nicht festgestellt werden. Nährstoffeinträge, vor allem an Nitrat und löslichem Phosphor, können jedoch durchaus eine Rolle spielen: Die Abnahme der Nitratkonzentration während des Fließens durch die Kanäle war in Hochbeet - Transekten signifikant stärker (von 4195 auf $57 \mu\text{g l}^{-1}$ Nitrat) als in vergleichbar komplexen Ökosystemen ohne Hochbeetbewässerung. Durch den Verbleib innerhalb des landwirtschaftlichen Systems (in den Wasserpflanzen der Kanäle oder durch Infiltration in die Hochbeete aufgenommen, können nachhaltig Nährstoffreserven gesichert werden (CARNEY et al. 1994, S.6).

Die Nährstoffvorräte an Kalium waren in beiden Systemen ausreichend. Im Oberboden der konventionellen Felder waren die Vorräte mit 1100 kg ha^{-1} (Tab. 11) am niedrigsten, würden jedoch bei einem mittleren Entzug von 241 kg ha^{-1} (Tab. 19) erst nach 4 Vegetationszeiten aufgezehrt sein. Eine geringe Nachlieferung schien jedoch aus dem System heraus zu erfolgen: Die Tendenz zeigte daß Kalium im Oberboden der konventionellen Felder während der Vegetationszeit von Z 1 bis Z 2 von 0,3 auf 1,5 $\text{cmol (+) / kg Boden}$ zunahm (Tab. 3), und bis zum Beginn der zweiten Vegetationszeit Z 3 nur leicht wieder abnahm (auf 1,2 $\text{cmol (+) / kg Boden}$, Tab. 3). Im Unterboden beider Systeme gab es sogar eine stetige Zunahme an K^+ , bei den konventionellen Feldern stärker (um insgesamt 3,3 von Z 1 bis Z 3; bei den Hochbeeten um insgesamt 2,3 $\text{cmol (+) / kg Boden}$, Tab. 3). Darüber hinaus waren die Kaliumvorräte im Unterboden der konventionellen Felder mit 3566 höher als bei den Hochbeeten mit 2686 kg ha^{-1} . Das ist vor allem deshalb günstig, weil im Unterboden des konventionellen Anbaus die Vorräte an pflanzenverfügbarem Kalium gering waren (Tab. 6 und 17), die kurzfristige Nährstoffversorgung deshalb gerade abgedeckt wurde. Längerfristig kann die Nährstoffversorgung durch die Nachlieferung an austauschbarem Kalium kompensiert werden, was für Kartoffeln wichtig ist, da sie für hohe Knollenerträge eine reichliche Nährstoffversorgung an Kali benötigen (FINCK 1979, S. 308). Die Hochbeete zeigten also außer den höheren Vorräten im Oberboden bei diesem Parameter keine wesentlichen Vorteile gegenüber dem konventionellen System.

Die Vorräte an Ca^{2+} und Mg^{2+} im Oberboden beider Systeme überstiegen mit $9298 \text{ kg Ca}^{2+} \text{ ha}^{-1}$ auf den Hochbeeten und $6056 \text{ kg Ca}^{2+} \text{ ha}^{-1}$ auf den konventionellen Feldern, sowie 6317 und $6807 \text{ kg Mg}^{2+} \text{ ha}^{-1}$ (Tab. 11) den mittleren Entzug mit $28 \text{ kg Ca}^{2+} \text{ ha}^{-1}$ und $9,3 \text{ kg Mg}^{2+} \text{ ha}^{-1}$ deutlich (Tab. 19). Die Ca^{2+} - Vorräte würden die Entzüge auf den Hochbeeten für ca. 300 Jahre, auf den konventionellen Feldern für ca. 200 Jahre decken.

5.5 Erträge

Die in dieser Arbeit festgestellten Erträge lagen mit $55,2 \text{ t ha}^{-1}$ Bitterkartoffeln auf den Hochbeeten und 54 t ha^{-1} auf den konventionellen Feldern auf deutlich höherem Niveau als in Untersuchungen anderer Autoren (Tab. 20). Dies ist insofern bemerkenswert als das Untersuchungsjahr 1997/98 als Folge des „El Niño“ – Phänomens ein an diesem Standort agroklimatisch außergewöhnlich trockenes Jahr war und angenommen wird, daß sich die potentiellen Vorteile der Hochbeete bezüglich Bodenwasser- und Temperaturverhältnissen insbesondere in klimatisch extremen Jahren im Ertrag niederschlagen. Der Niederschlag betrug im Vergleich zum Durchschnittswert von 660 mm / Jahr (vgl. 2.1) nur 420 mm / Jahr (Projektdatei PROSUKO). Die Verteilung der Niederschläge war jedoch gut (vgl. Abb. 6-9), da sich die zusätzliche Bewässerung bei den Hochbeeten trotz des trockenen Jahres nicht auf die Ertragshöhe (Einzelpflanze) ausgewirkt hat. Auch die Lage des Untersuchungsgebietes in unmittelbarer Seenähe mit höheren Jahresdurchschnittstemperaturen und einer Milderung der Temperaturamplitude (siehe 2.1) wirkte vermutlich auf die Ertragsbildung in beiden Systemen

positiv. Mit zunehmender Entfernung zum See nehmen die Niederschläge ab (Nord - Süd Gradient) und die landwirtschaftliche Produktion gelangt an ihre Grenzen.

Tab. 20: Zusammenstellung der Erträge von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii*, Sorte Luki) und normalen Kartoffeln (*Solanum tuberosum*, ssp. *andigena*) in t ha⁻¹ auf Hochbeeten und konventionellen Feldern nach verschiedenen Autoren

	Hochbeete		Konventionell		Bemerkungen
	Bitterkartoffel (<i>Solanum juzepczukii</i> , Sorte Luki)	Normale Kartoffel (<i>Solanum tuberosum</i> , ssp. <i>andigena</i>)	Bitterkartoffel (<i>Solanum juzepczukii</i> Sorte Luki)	Normale Kartoffel (<i>Solanum tuberosum</i> , ssp. <i>andigena</i>)	
	Erträge		t ha ⁻¹		
VORLIEGENDE ARBEIT (Tab. 12)	55,2		54,0		1997 / 98
VARGAS et al. (1998, S.31)	39,1		37,7		1997 / 98, die Flächen lagen direkt neben den Flächen dieser Arbeit
VACHER et al. (1991)			8,5	5,5	bei Dürre
			15	24	mit Bewässerung
VACHER et al. (1992, S.198)			17	11,5	
ANUARIO ESTADÍSTICO DEL SECTOR RURAL, S.58				3,9	1991 / 92
				4,3	1993 / 94
				4,2	1994 / 95
(VACHER 1998)			6,4	4,1	bei starker Trockenheit, 8 t ha ⁻¹ org. Düngung
VILLANUEVA et al. 1994, S.40- 42)	12,6	11,9	4,3	3,6	1992 / 93
PIWA Proyecto Inter- institucional Waru Waru (1997 / 98 persönliche Mitteilung)	12		9,4 6,6 7,2		4 t ha ⁻¹ org. Düngung, keine Fröste
	62		5		höchster Ertrag
(VILLANUEVA et al. 1994, S.29)				6,8	

Unter Bewässerungsbedingungen ist die normale Kartoffel mit Erträgen von 24 t ha⁻¹ durch die effizientere Ausnutzung des Wassers der Bitterkartoffel (15 t ha⁻¹) überlegen (Tab. 20). Unter Wasserstressbedingungen, die im Untersuchungsgebiet während der Vegetationszeit häufig auftraten, kommen jedoch die Vorteile der Bitterkartoffel zum Tragen. Sie kann bei zunehmender Trockenheit dem Boden mehr Wasser entziehen und ist in der Lage die

Spaltöffnungen auch bei Trockenheit offenzuhalten, während die konventionellen Kartoffeln einen totalen Stomataverschluß zeigen (VACHER et al. 1991). Es ist also zu vermuten, daß es beim Anbau normaler Kartoffeln unter den trockenen Bedingungen des Untersuchungsjahres 1997 / 98 zu Ertragsminderungen durch Wasserstress gekommen wäre.

Die in der vorliegenden Arbeit z.T. deutlichen Unterschiede der in beiden Systemen gemessenen Luft- und Bodentemperaturen, der Bodenfeuchte und bei den Bodennährstoffgehalten, wirkten sich entgegen der Arbeitshypothese nur geringfügig auf die Einzelpflanzenenerträge der Bitterkartoffel (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) aus. Erwartet wurden deutliche Ertragsdifferenzen (Faktor 2) zugunsten der Hochbeete. Die Erträge lagen jedoch in beiden Systemen auf demselben, sehr hohen Niveau und betragen ein Vielfaches der ortsüblichen Erträge (Tab. 20). Diese neue Erkenntnis widerspricht den anfangs gemachten Literaturangaben und stellt so einen wesentlichen Vorteil der Hochbeete gegenüber dem konventionellen System in Frage.

Bei einem Vergleich der Erträge unter dem Aspekt der Systemfläche, ergaben sich Ertragsunterschiede zwischen den Systemen zugunsten der konventionellen Felder (Tab. 21). Auf einem Hektar nutzbarer Fläche befinden sich 16 Hochbeete (100 m lang, 4 m breit) und 17 Wasserkanäle (100 m lang, 2 m breit). Die Nutzfläche beträgt in diesem System dementsprechend nur 70 % der Gesamtfläche. Im konventionellen System erfolgte eine 100 %ige Flächennutzung. Die Hochbeete stellen damit ein flächenintensives System dar und müßten im Vergleich zur konventionellen Nutzung mindestens 16 t ha^{-1} höhere Erträge bringen um diesen Nachteil auszugleichen. Da jedoch in der Untersuchungsregion kein Flächenmangel vorliegt, ist dieser Faktor in der Beurteilung der beiden Systeme nur von untergeordneter Bedeutung.

Tab. 21: Ertrag ha^{-1} von Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) in kg ha^{-1} unter Berücksichtigung der genutzten Systemfläche (konventionell 1 ha, Hochbeete 0,7 ha)

Landnutzungssystem	Ertrag (kg ha^{-1})
	kg von $0,7 \text{ ha}^{-1}$
Hochbeete	38 641
	kg von $1,0 \text{ ha}^{-1}$
Konventionell	54 039

Hinsichtlich der Nachhaltigkeit des Ertragsniveaus zeigten die Hochbeete durch die hohen Nährstoffvorräte bessere Voraussetzungen als die konventionellen Felder (Tab. 11). Für die Bauern steht unter den problematischen Anbaubedingungen auf der Hochebene (Altiplano) nicht allein die Ertragshöhe sondern vorwiegend die Risikominderung, bzw. – minimierung als wesentlicher Vorteil der Hochbeete im Vordergrund. Ähnlich der früher üblichen Risikoverteilung „risk spreading“, bei dem die Bauern Flächen in verschiedenen Klimazonen bearbeiteten. Dadurch kam es gleichzeitig auch zu einer Diversifizierung des Anbaus, weil auf den Flächen des Tieflands (Yungas, Andenostabdachung) Zitrusfrüchte angebaut werden konnten (HANAGARTH 1989). Die Diversifizierung des Anbaus, durch z.B. Gemüse, ist nur

auf Hochbeeten möglich, bzw. in Gewächshäusern oder im unmittelbaren Uferbereich des Sees. Dabei sind mit Zwiebeln und Knoblauch hohe Erträge erzielt worden (DURAN 1990). Wichtig zur Minderung der Bodenerosion während der Trockenzeit von Mai bis September wäre der Anbau von Zwischenfrüchten, dabei hat sich z.B. das Gemisch *Vicia Villosa* und Gerste bewährt (DURAN 1990). Auch das Aufbringen der abgesunkenen organischen Substanz in den Kanälen auf die Hochbeete würde sich in dieser Hinsicht positiv auswirken. Durch die nah gelegene Vermarktungsmöglichkeit (Batallas) können die Hochbeete mit dem Gemüse und dem Anbau von normalen Kartoffeln zur Einkommenssteigerung beitragen. Dadurch werden die Kosten relativiert, denen auf den Hochbeeten erst ab dem zweiten Anbaujahr Erträge gegenüberstehen, die Gewinne ermöglichen. Diese liegen dann über den Gewinnspannen im konventionellen Anbau, der jedoch bereits im ersten Jahr gewinnbringenden Anbau ermöglicht. 1 Hektar Hochbeetkonstruktion kostet 1546 \$US zuzüglich der Kartoffelanbaukosten von 539 \$US (insgesamt 2085 \$US) gegenüber 924 \$US für 1 Hektar konventionellen Anbau (UZQUIANO CARREÑO 1995, S.196).

6. Zusammenfassung

Die landwirtschaftliche Produktion auf der nördlichen Hochebene (Altiplano) in Bolivien wird durch klimatisch ungünstige Bedingungen während der Vegetationszeit von Oktober bis April begrenzt. Eine hohe Niederschlagsvariabilität bedingt Trockenphasen. Häufig auftretende Fröste sind ein weiterer limitierender Faktor und Grund für niedrige Erträge, bzw. hohe Ertragsausfälle.

In dieser Arbeit werden zwei Landnutzungssysteme am Titicacasee auf dem nördlichen Altiplano von Bolivien verglichen, der Hochbeet- und der konventionelle Feldanbau. Die 100 m langen und 4-5 m breiten Hochbeete (raised fields) sind umgeben von 2 m breiten Bewässerungskanälen. Sie stellen eine prähispanische, intensive Anbaumethode dar. Der überwiegende Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird gegenwärtig jedoch konventionell, d.h. im Regenfeldbau bewirtschaftet.

Die Hochbeete scheinen gegenüber dem aktuellen konventionellen Anbau deutlich höhere Erträge (Faktor 2) zu produzieren. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob neben den Faktoren Temperatur- und Bodenfeuchteverhältnisse weitere bedeutende Einflußgrößen den Ertrag in den Systemen beeinflussen.

Zu diesem Zweck erfolgte eine ausführliche Analyse der agroökologischen Standortbedingungen auf Hochbeeten (raised fields) und konventionell bewirtschafteten Feldern auf der nördlichen Hochebene (Altiplano) am Titicacasee in Bolivien. Untersucht wurden dabei auch die Luft- und Bodentemperaturen sowie die Bodenfeuchte während der Vegetationszeit in Hochbeeten und auf konventionellen Feldern. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag jedoch in der detaillierten Untersuchung der Nährstoffdynamik in beiden Systemen bei einem realistischen Düngungsniveau von $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ zur Beurteilung der besseren Standorteignung. Analysiert wurden dafür die Nährstoffkonzentrationen (N_{gesamt} , P (Olsen), $C_{\text{org.}}$, austauschbare Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) im Ober- und Unterboden der Systeme zu Beginn und Ende der ersten 1997 / 98 und zu Beginn der zweiten Vegetationszeit 1998 / 99. Die Erträge wurden ebenfalls erhoben.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den Systemen zeigten sich bei den Minimumlufttemperaturen in 10 cm Höhe. Bei Frostereignissen sanken die Temperaturen auf den Hochbeeten nicht so tief ab, wie im konventionellen System. Die aufgetretenen geringen Unterschiede würden bereits ausreichen, um Ertragsausfälle durch physiologische Schädigung der oberirdischen Grünmasse bei der frostempfindlichen „normalen“ Kartoffel (*Solanum tuberosum* ssp. andigena) auf Hochbeeten zu verhindern. Bei stärkeren Frösten würde sich diese temperaturpuffernde Wirkung der Hochbeete ebenfalls vorteilhaft auf die Erträge der frostresistenteren Bitterkartoffeln (*Solanum juzepczukii* Buk., Sorte Luki) auswirken. In dieser Hinsicht zeigten die Hochbeete die stärksten Potentiale, da die Ertragsausfälle durch Frost auf konventionellen Feldern bei normalen Kartoffeln bis zu 80 % betragen können.

Auf den Hochbeeten wurden auch in dem durch Fröste gefährdeten Zeitraum von 5.00 bis 8.00 Uhr morgens bei den Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe geringfügige Unterschiede

zugunsten der Hochbeete festgestellt, die sich positiv auf die Wurzelmasse der normalen Kartoffeln auswirken. Grund hierfür waren vermutlich die höheren bodennahen Lufttemperaturen, die den Boden der Hochbeete nicht so stark abkühlen ließen wie im konventionellen System. Die höheren Lufttemperaturen wirkten sich wiederum positiv auf die Ertragssicherung aus (siehe voriger Absatz).

Im Vegetationsverlauf waren die Unterschiede zwischen den Systemen vor allem im ersten Anbaujahr 1997/98 mit extremen Witterungsbedingungen (Trockenheit) deutlich, im klimatisch durchschnittlichen zweiten Anbaujahr nur gerinfügig ausgeprägt. Die Minimumbodentemperaturen in 10 cm Tiefe waren im Oktober zu Beginn der Vegetationszeit 1997/98 in den Hochbeeten deutlich höher als im konventionellen System. Dieses und die höheren Bodentemperaturen von 5.00 bis 8.00 Uhr morgens in 10 cm Tiefe im Tagesverlauf könnte ein Indiz auf die höhere, bzw. durch die ausgeglichene Bodenfeuchte längerfristige, Wärmespeicherfähigkeit des Hochbeetbodens sein.

Bei den Hochbeeten waren die Bodenfeuchten während der Vegetationszeit durchgängig in 25 cm Tiefe höher als in 15 cm, während es sich im konventionellem Anbau anders herum verhielt. In den Hochbeeten erfolgte kapillarer Aufstieg, so daß dieses System durch die stetige Nachlieferung der Bodenfeuchte eine Unabhängigkeit von den unregelmäßigen Niederschlägen gewährleistete. Im konventionellen System war die Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe höher und die Bodenwasserbewegung nach unten gerichtet, so daß durch die hohe Bodenevaporation und die Versickerung des Bodenwassers ungünstigere Bedingungen für die physiologische Entwicklung der Kartoffeln vorlagen.

Die Hochbeete zeigten generell höhere Nährstoffkonzentrationen (C_{org} , N_{gesamt} , P (Olsen), austauschbare Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ im Ober- und Unterboden als die konventionellen Felder. Der Hauptunterschied bestand in dem nährstoffreicheren Unterboden der Hochbeete gegenüber den konventionellen Feldern. Bei der Konstruktion der Hochbeete wurden die mit dem Sumpfgras Totorilla (*Scirpus rigidus*) bewachsenen oberen Bodenschichten in tiefere Bodenschichten verlagert. Durch die hohen Nährstoffvorräte, v.a. an organischer Substanz im Unterboden wird eine langfristige Nährstoffnachlieferung gewährleistet.

Die wichtigsten Parameter zur Unterscheidung der Systeme waren die EL, Ca^{2+} , P (Olsen) und die org. Substanz.

Bei den Hochbeeten trat eine tendenziell höhere Versalzungsgefahr auf als bei den konventionellen Feldern. Diese Problematik könnte jedoch möglicherweise durch genügend Wasser in den Kanälen gemildert werden.

Der pflanzenverfügbare Phosphor P (Olsen) könnte im konventionellen System eher noch als in den Hochbeeten, zum kurzfristig limitierenden Faktor werden. Wobei in den Hochbeeten jedoch durch eine höhere bodenbiologische Aktivität als im konventionellen System wahrscheinlich eine zusätzliche Freisetzung an org. gebundenem Phosphor erfolgt.

Bei Kalium war der mittelfristige, pflanzenverfügbare Anteil in den konventionellen Feldern zwar gering, die langfristige Nachlieferung durch das austauschbare Kalium schien jedoch in

den konventionellen Feldern im zeitlichen Verlauf etwas stärker zu sein als in den Hochbeeten.

Im Zeitablauf von der Saat bis zur Ernte und zur zweiten Saat waren es vor allem die Parameter organische Substanz und P (Olsen), die die Systeme deutlich unterschieden und eine höhere Nährstoffdynamik in den Böden der Hochbeete anzeigten.

Es wurden also deutliche Unterschiede zwischen den Systemen hinsichtlich der Bodennährstoffgehalte festgestellt. Diese wirkten sich jedoch nicht auf die Erträge aus, denn es wurden lediglich sehr geringe Ertragsunterschiede festgestellt. Potentielle Nährstoffvorteile realisierten sich also kaum. Die Erträge fielen in beiden Systemen, verglichen mit regional üblichen Erträgen, sehr hoch aus. Trotz der außergewöhnlichen klimatischen Bedingungen des Anbaujahres 1997/98 bewirkten die festgestellten Temperaturvorteile beim Hochbeetanbau keine bedeutsamen Ertragsunterschiede. Vermutlich kommen diese Vorteile jedoch erst in noch extremeren Jahren mit einer ungünstigen Niederschlagsverteilung zum Tragen, bzw. bei einem bestimmten Zusammenspiel mehrerer ungünstiger Faktoren. Dieses dürfte vor allem mit zunehmender Marginalität der Standorte, d.h. mit zunehmender Entfernung zum Titicacasee sichtbar werden.

Da Phosphor als limitierender Faktor auftrat, könnten Untersuchungen zur bodenbiologischen Aktivität mit dem Parameter mikrobielle Biomasse Aufschluß darüber geben, in welchem Umfang und wie stetig die Nachlieferung von org. gebundenem Phosphor durch die Bakterien in den beiden Anbausystemen erfolgt.

Zur vergleichenden Analyse der ertragslimitierenden Wirkung der verschiedenen Einflußfaktoren wären Langzeituntersuchungen mit einer großen Datengrundlage sinnvoll, die den Einfluß der wechselhaften Klimabedingungen möglichst gering halten.

Summary

Agricultural production on the northern altiplano of Bolivia is limited by extreme climatological conditions during growing season from October till April. Severe frosts and a highly irregular rainfall cause crop destruction and low yields.

This study compares two agricultural production systems near the lake Titicaca on the northern altiplano of Bolivia, production on raised fields and in conventional rain-fed farming systems. Raised field agriculture is a prehispanic intensive crop production system. Elevated planting platforms (length 100 m, width 4-5 m) are surrounded by irrigation canals (width 2 m). The main part of the agricultural area is presently managed with conventional rain fed farming systems.

Raised Fields seem to produce two times higher yields than the conventional production system. This research analyses if the yields in these two systems are influenced by other factors than temperature and soil moisture.

Agroecological conditions were examined by measuring the air and soil temperatures and the soil moisture during the growing season 1997 / 98, and the beginning growing season 1998 / 99. The research focused on a detailed investigation of the nutrients in the top and subsoil of raised fields and conventional rainfed farming systems. The following methods were employed: N_{tot} . (principle of Kjeldahl), P (Olsen), C_{org} . (Walkley & Black), exchangeable cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (extraction with $NH_4^+ac.$). Yields were also calculated.

Important differences between the systems were detected concerning minimum air temperatures (height 10 cm above ground). During frost occurrence these temperatures in the raised fields did not fall as low as in the conventional cropping system. These differences, although small, could prevent crop losses through physiological damages of the upper green mass of normal potatoes (*Solanum tuberosum*, ssp. andigena). With increasing intensity of frosts also the more frost resistant bitter potato (*Solanum juzepczukii* Buk., var. Luki) would get a higher protection in the raised field system than in the conventional cropping system. In this aspect raised fields showed important advantages because yield destruction through frosts on normal potatoes in conventional cropping systems could achieve 80 %.

Also in the course of the day between 5.00 and 8.00 a.m. the soil temperatures at a depth of 10 cm were slightly higher in the raised fields, having positive effects on roots of normal potatoes. The reason of this were probably the higher air temperatures near the surface of the soil, what diminished the intensive cooling of the soil in the raised fields compared to conventional land use. These higher air temperatures prevent the loss of yields (see above).

During the vegetation period 1997 / 98 with extreme climatological conditions (drought) the differences between the systems were very clear, in the second season they were only slightly visible. The minimum soil temperatures (depth 10 cm) in October 1997 / 98 were significantly higher in the raised fields than in the conventional fields. These phenomenon and the higher soil temperatures between 5.00 and 8.00 a.m. (depth 10 cm) could be a sign of a higher and a fairly long term capacity of thermal storage in the soil of the raised fields.

The soil moisture throughout the growing season was higher in 25 cm than in 15 cm depth of soil in the raised fields, meanwhile in the rainfed conventional cropping system it was the very opposite. In the raised field system the soil moisture was directed upwards (capillary movement), so the system was independent about irregular rainfall through a constant flow of moisture. In the conventional system the soil moisture was higher in 15 cm (depth of soil) and the movement of the soil moisture was downwards, so conditions for the physiological development of the potatoes were unfavourable because of the high soil evaporation and the drainage of the water.

The soils of the raised fields generally showed significant higher nutrient concentrations (C_{org} , N_{tot} , P (Olsen), exchangeable cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ in the top and subsoil than the conventional system. The main difference was the higher nutrient saturated subsoil in the raised field system compared to the conventional cropping system. Constructing the raised fields the upper parts of the soil covered with Totorilla (*Scirpus rigidus*) were shifted

downwards. A long term flow of nutrients is provided because of the high stock of nutrients, especially organic matter, in the raised fields.

The most important parameters differentiating the systems were EC, Ca^{2+} , P (Olsen) and organic matter.

The risk of Salinization was higher in the raised field system, but could be mitigated with sufficient irrigation water in the canals.

Available phosphorous (Olsen) will be a short term limiting factor mostly in the conventional rain fed farming system. In the raised fields through higher microbiological activity in the soil an additional release of organically bounded phosphor took place.

With potassium the plant available part was in the middle term low in the rain fed farming system, but the long term release of exchangeable potassium seemed to be somewhat higher in the conventional system than in the raised field system.

In the course of the time from seeding till harvest mainly the parameters organic matter and phosphorous (Olsen) differentiated the systems, and indicated a higher dynamic in the raised field than in the conventional farming system.

Clear differences between the systems were determined in the nutrient concentrations in the soils. These differences did not affect the yields, because only slight differences between yields were determined. Potential advantages in nutrient stocks were not realized. But the yields in both systems were very high compared to locally usual yields.

Despite the unusual climatological conditions during the vegetation period of 1997 / 98 the observed advantages in temperatures in the raised field system did not cause differences in yields. Probably these advantages do not have effects until worse climatological conditions with highly irregular rainfall or with the coincidence of several unfavourable factors will show up. This would be principally the case with increasing marginality, achieved with increasing distance to the lake Titicaca.

Since phosphorous appeared as a limiting factor, investigations about biological activity in the soil using the parameter: microbiological biomass could inform about the quantity and the steadiness of the delivery of organically bounded phosphorous in both systems.

Long term investigations with high data bases to avoid influences by highly variable climatic conditions base would be helpful in the context of an comparative analysis of yield limiting factors.

Resumen

La producción agronómica en el altiplano norte de Bolivia es limitada por factores climáticos adversos durante la campaña agrícola (época de vegetación) desde octubre hasta abril. Sequías causadas por una variabilidad alta de precipitación y heladas frecuentes son factores limitantes que provocan rendimientos bajos ó la perdida total de las mismas.

En este trabajo dos sistemas de uso de suelo en el altiplano norte de Bolivia en las cercanías del lago Titicaca son comparados, producción agrícola en campos elevados (Suka Kollus) y en el sistema convencional. Los campos elevados tienen 100 m de longitud, 4 - 5 m de ancho y son rodeados por canales de agua (2 m de ancho). Representan un sistema prehispánico de producción intensiva. La mayor parte del uso actual de la tierra se trabaja con el sistema convencional, es decir producción agrícola con lluvias únicamente.

Aparentemente los campos elevados tienen mayores rendimientos (factor 2) en comparación con el sistema convencional. En esta tesis se investiga, si aparte de los factores de temperatura y humedad de suelo otros parámetros tienen una influencia significativa en los rendimientos de los dos sistemas.

Por esta razón se analizó ampliamente las condiciones agroecológicas de los campos elevados y del sistema convencional. Se analizaron las temperaturas de aire y suelo como también la humedad del suelo durante la época de vegetación. Tema principal de esta tesis fué el análisis detallado de la dinámica de nutrientes en los dos sistemas con un nivel realístico de fertilización orgánica de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ para evaluar la mejor adaptación al lugar. Para esto se emplearon los siguientes métodos: N_{tot} (principio de Kjeldal), P (Olsen), C_{org} (Walkley & Black), cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (extracción con NH_4^+ ac.). También se efectuó una calculación de los rendimientos.

Las diferencias más importantes entre los sistemas se mostraron en las temperaturas mínimas del aire a 10 cm de altura. Durante heladas las temperaturas sobre los campos elevados no bajaron tanto como en el sistema convencional. Las diferencias aparecidas aunque pequeñas serían ya suficientes para impedir pérdidas en rendimientos por dañar la masa vegetal superior de la papa "normal" (*Solanum tuberosum*, ssp. andigena) en campos elevados. Ocurriendo heladas más fuertes esa reacción amortiguador de temperaturas de los campos elevados se traducirá también para las papas amargas (*Solanum juzepczukii* Buk., var. Luki) las cuales son más resistentes a las heladas. Aquí los campos elevados mostraron los potenciales más fuertes, porque pérdidas de rendimientos de papas normales en sistemas convencionales pueden alcanzar 80 %.

En las horas críticas con un riesgo alto de ocurrencia de heladas, desde las 5.00 hasta las 8.00 de la mañana, se midieron también diferencias en las temperaturas de suelo a 10 cm de profundidad, que fueron mayor en los campos elevados y tenían una influencia positiva sobre las raíces. La razón por esto probablemente fueron las temperaturas de aire mayores cerca del suelo, que impidieron que el suelo se enfrió tanto como en el sistema convencional. Estas temperaturas de aire un poco mayores tendrían el efecto protector ya mencionado.

Durante el primer transcurso de la época de vegetación 1997 / 98 con condiciones climáticas extremas las diferencias entre los sistemas fueron significativas mientras que en la segunda época con condiciones climáticas medianas se determinaron solamente pequeñas diferencias. Las temperaturas mínimas de suelo (10 cm de profundidad) fueron significativamente más altas en los campos elevados que en el sistema convencional al principio de la época de vegetación en octubre 1997 / 98. Este fenómeno y las temperaturas de suelo (10 cm de profundidad) más altas en las horas críticas de 5.00 a 8.00 en la mañana podría indicar una más alta y más larga, por el contenido alto de humedad en el suelo, capacidad de retención de calor en el suelo de los campos elevados.

En los campos elevados el contenido de humedad del suelo en 25 cm de profundidad fué mayor que en 15 cm de profundidad durante toda la época de vegetación, mientras que en el sistema convencional fué al revés. En los campos elevados se efectuó ascensión capilar, así que el sistema fué independiente de las lluvias irregulares por el flujo constante de humedad. En el sistema convencional la humedad fué mayor en 15 cm de profundidad y el movimiento del agua dirigido hacía abajo. Por la gran evaporación por el suelo y la dirección del agua hacía abajo las condiciones para el desarrollo fisiológico de la papa no fueron tan favorables como en los campos elevados.

Los suelos de los campos elevados mostraron generalmente mayores concentraciones de nutrientes: $N_{\text{tot.}}$, P (Olsen), $C_{\text{org.}}$ (Walkley & Black) y cationes intercambiables Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ en la capa arable y el subsuelo. La diferencia principal se detectó en el subsuelo (20-40 cm) más enriquecido en nutrientes en el sistema de campos elevados que en el sistema convencional. En la construcción de los campos elevados las capas superiores del suelo cubiertos con Totorilla (*Scirpus rígido*) fueron trasladados a profundidades mayores. Por las reservas grandes de nutrientes, sobre todo de materia orgánica en el subsuelo, se garantiza un flujo constante de nutriente a largo plazo.

Los parámetros más importantes para diferenciar los dos sistemas fueron CE (Conductividad eléctrica), Ca^{2+} , P (Olsen) y materia orgánica.

En los campos elevados apareció un mayor riesgo de salinización que en el sistema convencional, que se podría mitigar con suficiente agua en los canales.

El fósforo disponible (Olsen) podrá ser un factor limitante a corto plazo en el sistema convencional más que en los campos elevados. Además en los campos elevados por una actividad biológica en el suelo mayor que en el sistema convencional, se libera adicionalmente fósforo fijado orgánicamente.

La parte de potasio disponible para plantas a mediano plazo fué poco en el sistema convencional, pero la liberación del potasio intercambiable lo cuál es disponible a largo plazo, aparentemente fué mayor en este sistema que en los campos elevados en el transcurso del tiempo.

Desde la siembra hasta la cosecha y hasta la segunda siembra sobre todo los parámetros materia orgánica y fósforo (Olsen) diferenciaron los dos sistemas y mostraron una dinámica mayor en los campos elevados que en el sistema convencional.

Se determinaron diferencias significativas de nutrientes del suelo entre los dos sistemas. Estas no influenciaron los rendimientos, porque se midieron solamente diferencias insignificantes entre los rendimientos de los dos sistemas. Ventajas potenciales de nutrientes entonces no se realizaron. Pero los rendimientos de los dos sistemas comparados con rendimientos locales fueron muy altos. Aparte de que fueron condiciones climáticas extraordinarias en el año 1997 / 98 las diferencias de temperaturas a favor de los campos elevados no causaron diferencias en los rendimientos. Probablemente estas ventajas se realizarán recién en años más extremos con una distribución mala de precipitación ó cuando varios factores adversos aparecerán en conjunto. Esto será el caso con un aumento de la marginalidad, significando un aumento de la distancia al lago Titicaca.

Fósforo aparece como factor limitante, así que con investigaciones sobre la actividad biológica en el suelo utilizando el parámetro biomasa microbiana, se podrá determinar la cantidad y la constancia de flujo por liberación de fósforo fijado orgánicamente en los dos sistemas.

Para un estudio comparativo de los factores limitantes para el rendimiento investigaciones a largo plazo con una base grande de datos serán útil para eliminar la influencia de las condiciones climáticas variables.

7. Literaturverzeichnis

- ACHTNICH, W. (1980): Bewässerungslandbau. Agrotechnische Grundlagen der Bewässerungslandwirtschaft. Ulmer, Stuttgart, 621 S.
- AGUILAR, P.C. (1992): Comportamiento de la papa (*Solanum Tuberosum* ssp. *Andigena*) en Waru-Waru y otras zonas de producción. In: Avances de Investigación sobre la tecnología de Waru-Waru. Vol. II. Producción Agrícola. PIWA. Puno, Peru. S.203-206
- AGUILAR, P.C., MURILLO, A.C., VACHER, J.J., INQUILLA, V. und AQUIZE, E. (1994): Microclima del sistema de camellones. In: Microclimatología en el agroecosistema de Waru Waru. 1. Avances de Investigación. Hrsg.: Programa Interinstitucional de Waru Waru, Convenio PELT / INADE-COTESU. Puno, Peru, 133 S., S.88-115
- AGUILAR, P.C., MURILLO, A.C., VACHER, J.J., INQUILLA, V. und YUPANQUI, E.C. (1994): Diferencias microclimáticas en agroecosistemas del altiplano. In: Microclimatología en el agroecosistema de Waru Waru. 1. Avances de Investigación. Hrsg.: Programa Interinstitucional de Waru Waru, Convenio PELT / INADE-COTESU. Puno, Peru, 133 S., S.116-133
- AHL, C., BECKER, K., JÖRGENSEN, R., KLAGES, F., MEYER, B., und WILDHAGEN, H. (1992): Aspekte und Grundlagen der Bodenkunde. 21. Auflage, Eigenverlag Institut für Bodenkunde, Göttingen, 316 S.
- AHLFELD, F. und BRANISA, L. (1960): Geología de Bolivia. Instituto Boliviano del Petroleo, Editorial Don Bosco, La Paz, Bolivia, 245 S.
- AHLFELD, F. (1972): Geología de Bolivia. Enciclopedia Boliviana, Editorial Los Amigos del Libro, La Paz, Bolivia, 245 S.
- AHLFELD, F. (1973): Geografía Física de Bolivia. Enciclopedia Boliviana, Editorial Los Amigos del Libro; La Paz, Bolivia, 243 S.
- ANUARIO ESTADÍSTICO DEL SECTOR RURAL (1995 / 96), Hrsg.: CID Centro de Información para el desarrollo, 331 S.
- BACKHAUS, K. et al. (1996): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 8. verbesserte Auflage, Springer Berlin New York, 591 S.
- BARHAM, A.J., HARRIS, D.R. (1985): Relict Field Systems in the Torres Strait Region. In: Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S., part i, Vol 1, BAR International Series 232, 434 S. 247-283
- BIESBOER, D.D., BINFORD, M. und KOLATA, A. (1999): Nitrogen Fixation in Soils and Canals of Rehabilitated Raised – Fields of the Bolivian Altiplano. *Biotropica* 31, Vol.2, S. 255-267
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE UND GEOLOGISCHE LANDESÄMTER, Hrsg. (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. Arbeitsgruppe Bodenkunde, 3. Auflage, 331 S.

- CARNEY, H.J. (1994): Land use changes and ecotonal responses in a unique tropical landscape. In: Proceedings of the international workshop on: The ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones. University of Washington, Seattle, USA, S.80-85
- CARNEY, H.J. und MARIN, R. (1994): Andean Raised - Field Agriculture: Functional analog of wetlands. Institute of Environmental Studies, University of California, Davis, USA, S.1-9
- CHAMBILLA, M. (1994): Fenómeno de las heladas y evaluación de daño. In: Microclimatología en el agroecosistema de Waru Waru (Raised Fields) –Avances de Investigación-. Programa Interinstitucional de Waru Waru, convenio PELT (Proyecto Especial Lago Titicaca)-INADE/COSUDE Cooperación Suiza al Desarrollo, S.11-22
- COCHRANE und BARBER (1993): Análisis de suelos y plantas tropicales. CIAT Centro de Investigación de Agricultura tropical, Santa Cruz, Bolivia, 226 S.
- COUNCIL ON SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS, Hrsg. (1992): Handbook of reference methods for soil analysis. List of analytical methods for the analysis of soil for their chemical properties. Georgia University Station, USA
- DE MELLO, J.W.V., BARRÒN, V. and TORRENT, J. (1998): Phosphorus and Iron Mobilization in flooded soils from Brazil. Soil Science. An Interdisciplinary Approach to Soil Research, Vol. 163, No. 2, S. 122-132
- DE la Cuba, C.B., AGUILAR, P.C., YUPANQUI, E.J. und LOPEZ, V.V. (1994): Efecto de la infraestructura de Waru-Waru en el microclima: anchos de terraplén y canal, presencia de agua en la variación de las temperaturas mínimas y rendimiento de papa. In: Microclimatología en el agroecosistema de Waru Waru. 1. Avances de Investigación. Hrsg.: Programa Interinstitucional de Waru Waru, Convenio PELT / INADE-COTESU. Puno, Peru, 133 S., S. 45-87
- DENEVAN, W. und MATHEWSON, K. (1983): Preliminary Results of the Samborondon Raised Field Project, Guayas Basin, Ecuador. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, S.167-182
- DIEKKRÜGER, B. (1992): Standort- und Gebietsmodelle zur Simulation der Wasserbewegung in Agrarökosystemen. Hrsg.: Institut für Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig, Selbstverlag, S.12-13
- DURAN, C. (1990): Habilitación de terrenos no aptos para la agricultura mediante la construcción de camellones (Raised Fields) en la región de Caquiaviri (Altiplano). Tesis de Grado (unveröffentlichte Diplomarbeit), Facultad de Agronomía, UMSA Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 90 S.
- ELLENBERG, H. (1981): Desarrollar sin destruir –Respuestas de un ecólogo a 15 preguntas de agrónomos y planificadores bolivianos-. Revista del Instituto de Ecología, segunda edición 1983, UMSA Universidad Mayor de San Andrés

- ERFMEIER, A., HILKER, C. (1998): Studienpraktikum zur Tropenbotanik, Bolivien. Abteilung für systematische Botanik, Albrecht von Haller Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen, S.46
- ERICKSON, C.L. (1989): Raised Field Agriculture in the Lake Titicaca Basin. Expedition, Vol. 30, Nr.3
- ESTRADA, N. (1991): Importancia Genética de las papas amargas. In: 1ra Mesa redonda Perú – Bolivia, 7-8 mayo, Hrsg.: Rea, J. und Vacher, J.J., S.11-14
- FAO (1985): Guidelines: land evaluation for irrigated agriculture. Soils Resources, Management and Conservation Service, FAO Land and Water Development Division FAO soils bulletin 55, 231 S.
- FINCK, A. (1991): Pflanzenernährung in Stichworten. 5. Auflage, Ferdinand Hirt, Berlin, 200 S.
- FINCK, A. (1979): Dünger und Düngung. Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen. Verlag Chemie, 442 S.
- GEOBOL SERVICIO GEOLOGICO DE BOLIVIA (bzw. SERGEOMIN) / SWEDISH GEOLOGICAL AB (Hrsg.) (1995): Carta geologica de Bolivia, hoja Achacachi, esc. 1: 100 000
- GEOBOL SERVICIO GEOLOGICO DE BOLIVIA (bzw. SERGEOMIN) / CIASER CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS (Hrsg.) (1985): Estudio Integrado de los recursos naturales del departamento de La Paz, Suelos, Hoja SE 19 -3
- GORECKI, P.P. (1985): The conquest of a new "wet and dry" territory: ist mechanism and ist archaeological consequence. In: Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S., part i, Vol.1, BAR International Series 232, 434 S., S.321-346
- GLIESSMAN, S.R. et al. (1983): Ancient Raised Field Agriculture in the Maya Lowlands of Southeastern Mexico. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, S. 91-110
- GLIESSMAN, S.R., TURNER, B.L., ROSADO MAY, F.J. und AMADOR, M.F. (1985): Ancient raised field agriculture in the maya lowlands of southeastern Mexico. In: Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S., part i, Vol 1, BAR International Series 232, 434 S., S.97-111
- GRACE, B. (1985): El clima del altiplano del departamento de Puno. Hrsg. Convenio Peru – Kanada. CIPA XXI. Puno, Peru. 180 S.
- GRAF, K. (1998): Bolivien –Probleme und Chancen der dritten Welt-. Bearbeitet für den Geographieunterricht an Gymnasien. Geographisches Institut Universität Zürich,
- GRAFFAM, G. (1992): Beyond State Collapse: Rural History, Raised Fields, and Pastoralism in the South Andes. In: American Anthropologist 94, 4, S. 882-904

- HANAGARTH, W. (1989): Ecology and Risk-Spreading in the Small-Holding Agriculture of the Semi-Arid Puna in Bolivia. In: Plant research and development. Hrsg.: Institut für wissenschaftliche Zusammenarbeit, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Vol. 30, S.76-103
- HUANCO UND CANAHUA (1994): Fases Fenológicas del Cultivo de la Papa Amarga. In: Genética y Mejoramiento de cultivos altoandinos. PIWA Programa Interinstitucional de Waru Waru, – PELT Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca, Puno, Peru, 458 S.
- IFA International Fertilizer Industry Association (1992): World Fertilizer Use Manual, 774 S., S.120-121
- ILACO B.V. International Land Development Consultants and Ministry of Agriculture and Fisheries, Arnhem, the Netherlands, Hrsg., (1981): Agricultural Compendium for rural development in the tropics and subtropics. Elsevier, 739 S.
- INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR (IGM) Hrsg. (1970): Topographische Karte La Paz. SE 19-3, Maßstab 1:250.000
- JEFFREY, S. UND WILKERSON, K.(1983): So Green and Like a Garden: Intensive Agriculture in Ancient Veracruz. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester 1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, S.55-90
- KÖPPEN, W. (1931): Grundriss der Klimakunde. De Gruyter, zweite verbesserte Auflage, Berlin. S.125-129
- KNAPP, G. und RYDER, R. (1983): Aspects of the Origin, Morphology and Function of Ridged Fields in the Quito Altiplano, Ecuador. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester 1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford 1983, S.201-220
- KRETZSCHMAR, R. (1991): Kulturtechnisch - Bodenkundliches Praktikum. Ausgewählte Laboratoriumsmethoden. Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 7. Auflage, S.266-269
- KRETZSCHMAR, R. (1994): Kulturtechnisch - Bodenkundliches Praktikum. Ausgewählte Laboratoriumsmethoden. Eine Anleitung zum selbstständigen Arbeiten an Böden. 8. Auflage, Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Band 1, Physikalische Verfahren der Standortuntersuchung und Band 2, Chemische Verfahren der Standortuntersuchung, 877 S.
- LAMBERT, J.D.H. (1985): The Ecological Consequences of ancient Maya Agricultural Practices in Belize. In: Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S., part i, Vol 1, BAR International Series 232, 434 S., S.113-126
- LAMBERT, J. und ARNASON J.T. (1983): Ancient Maya Land-Use and Potential Agricultural Productivity at Lamanai, Belize. In: Drained Field Agriculture in Central and South

- America. Proceedings 44 International Congress of Americanists, Manchester 1982, hrsg. v. Darch, J.P., BAR International Series 189, S.111-122
- LANDON, J.R., Hrsg. (1992): Booker Tropical Soil Manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Booker Agriculture International Limited, London, England, 450 S.
- LAUER, W. und ERLNBACH, W. (1987): Die tropischen Anden. Geoökologische Raumgliederung und ihre Bedeutung für den Menschen. In: Geographische Rundschau 39, S.86-95
- LENNON, T.J. (1983): Pattern Analysis of Prehispanic Raised Fields of Lake Titicaca, Peru. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists, Manchester 1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, S.183-200
- LE TACON, PH., ALLIROL, G., VACHER, J.J., BOSSENO, R. (1992): Los riesgos de helada para la agricultura en el altiplano boliviano. Symposium/Workshop on practical applications of agrometeorology to plant protection, Asunción, Paraguay, 9 S.
- LE TACON, PH., VACHER, J.J., ELDIN, M., IMAÑA, E. (1992): Los riesgos de helada en el altiplano boliviano. In: Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos, La Paz, Bolivia, del 4.-8.febrero. IBTA-ORSTOM-CIID-Canadá, Hrsg.: Morales, D., Vacher, J.J., S.287-291
- LINSER, H., Hrsg. (1965): Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung. Dritter Band, Düngung der Kulturpflanzen, erste Hälfte, Springer Verlag, 842 S., S.423
- MENGEL, K. (1991): Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Überarbeitete Auflage, Jena, 466 S.
- MILLER, R.O., KOTUBY-AMACHER, J. (1995): Western States Laboratory Proficiency Testing Program. Soil and Plant Analytical methods. S.32
- MIRANDA, F. (1998): Enumeración e identificación de las bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre en suelos de Suka Kollus (Raised Fields) en las cercanías del lago Titicaca (comunidad Catacora-Batallas). Tesis de Grado en Ciencias Biológicas (unveröffentlichte Diplomarbeit), UMSA Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivien, 58 S.+ Anhang
- MONTES DE OCA, I. (1989): Geografía y Recursos Naturales de Bolivia. Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, 574 S.
- MORALES, I., AMURRIO, P. und RUIZ, C. (1998): Efecto de la incorporación de diferentes niveles de estiércol y su descomposición en suelos de Suka Kollus (Raised Fields) y Pampa con cultivo de papa. Estudio de Batallas, lago Titicaca, PROSUKO Proyecto Interinstitucional Suka Kollus, La Paz, Bolivia, 65 S.
- MORALES, I., AMURRIO, P. und RUIZ, C. (1997): Estudio de la salinidad en los sistemas Suka Kollus (Raised Fields) y Pampa en el transcurso de una campaña agrícola, localidad Aygachi. In: Ecología en Bolivia 30, S.75-89

- MUÑOZ REYES, J. (1977): Geografía de Bolivia. Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, 478 S.
- Murillo, A.C., Salluca, J.C. und Chambilla, M.Q. (1992): Aspectos agroclimáticos de camellones en Puno-Peru. In: Avances de Investigación sobre la tecnología de Waru Waru. 1. Infraestructura. Hrsg.: Programa Interinstitucional de Waru Waru, Convenio PELT / INADE-COTESU. Puno, Peru, 240 S.
- MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (1981): Die Landschaftsgürtel der Erde. 2., durchgesehene Auflage, Stuttgart, S.73-97
- ORTLOFF, Ch. (1989): Análisis termométrico de los sistemas de campos elevados en el área de la Pampa Koani. In: Arqueología de Lukurmata 2, Hrsg.: Proyecto Wilajawira, Universidad de Chicago, Instituto Nacional de Arqueología de Bolivia, 290 S., S.237-261
- PAGE, A.L. et al., Hrsg. (1982): Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and Microbiological properties. American society of agronomy and soil science society of America, Number 9 (part 2) in the series agronomy, Wisconsin, USA, 1159 S.
- PAGEL, H., ENZMANN, J., MUTSCHER, H. (1982): Pflanzennährstoffe in tropischen Böden – ihre Bestimmung und Bewertung. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, 272 S.
- POHLMANN, J. (1976): Vergleichende photogeologische und geomorphologische Untersuchungen in den Gebieten Huayna Potosí, Apolo und Rurrenabaque (Departamento La Paz und Beni, Bolivien). Dissertation, Fachbereich Geowissenschaften FU Berlin, 202 S.
- REHM, S., Hrsg. (1986): Handbuch der Landwirtschaft und Ernährung in den Entwicklungsländern. Band 3, Grundlagen des Pflanzenbaues in den Tropen und Subtropen. 2. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart, 478 S.
- RICHARDS, L.A., Hrsg. (1962): Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura Num. 60, Departamento de agricultura de los Estados Unidos de America, traducción al español: agencia para el desarrollo internacional (A.I.D.), 172 S.
- RICHTER, J. (1992): Einführung in die Bodenkunde für Geoökologen. Universität Braunschweig. 293 S., S.225
- RILEY, T.J., FREIMUTH, G. (1979): Field Systems and Frost Drainage in the Prehistoric Agriculture of the Upper Great Lakes. In: American Antiquity, Vol. 44, Nr.2, S. 271-285
- ROCHE, M.A., BOURGES, J. et al. (1992): Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca. In: El lago Titicaca. Hrsg.: Dejoux, C. und Iltis, A., Instituto Francés de Investigación Científica para el desarrollo en Cooperación ORSTOM – Hisbol, La Paz, S.83-104

- RODRIGO, L.A., CASTAÑOS, A. (1978): Sinópsis estratigráfica de Bolivia. I Parte de Paleozoico. Academia Nacional de Ciencias de Bolivia, 146 S.
- ROWELL, D.L. (1997): Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. 614 S.
- SANCHEZ DE LOZADA, D. (1996): Heat and moisture dynamics in Raised Fields of the lake Titicaca region, Bolivia. Dissertation, Faculty of the graduate school, Cornell University, USA, 162 S.
- SANCHEZ DE LOZADA, D., BAVEYE, P., RIHA, S. (1998): Heat and moisture dynamics in raised field systems of the lake Titicaca region (Bolivia). In: Agricultural and Forest Meteorology 92, p. 251-265
- SIEMENS, A.H. (1983): Modelling Pre-Hispanic Hydroagriculture on Levee Backslopes in Northern Veracruz, Mexico. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford, S. 27-54
- SIEMENS, A.H. (1985): Results of recent air reconnaissance over the mexican state of Veracruz. In: Prehistoric Intensive Agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S. part i, Vol 1, BAR International Series 232, 434 S., S.127-143
- SCARBOROUGH, V. (1983): Raised Field Detection at Cerros, Northern Belize. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford, S. 123-136
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.P., STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten. Berlin, Oxford, 2. neubearbeitete Auflage, 295 S.
- SMITH, R.T. (1983): Drained Field Agriculture and Soil Fertility. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, Hrsg.: Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford, S. 251-263
- SMITH, C.T., DENEVAN, W.M., HAMILTON, P. (1968): Ancient ridged fields in the region of lake Titicaca. Geographical Journal 134, S.353-367
- STAB, S., ARCE, J. (1999): Pre-Hispanic Raised-Field Cultivation as an Alternative to Slash-and-Burn Agriculture in the Bolivian Amazon: Agroecological Evaluation of Field Experiments. In: Dallmeier, F., Miranda, C., Cluesener-Godt, M., MacBryde, O. (Hrsg.): Scientific research at Beni Biological Station Biosphere Reserve-10 years of contribution to Protected Area Development in Latin America. Paris:UNESCO, SI/MAB Series, No.4, Seitenzählung steht noch nicht fest.
- TURNER, B.L. (1983): Constructional Inputs for Mayor Agrosystems of the Ancient Maya. In: Drained Field Agriculture in Central and South America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester1982, hrsg. v. Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford, S.11-26

- UZQUIANO CARREÑO, C. (1995): Análisis hidráulico del sistema de riego mediante campos elevados (Suka Kollus, Raised Fields). Tesis de Grado (unveröffentlichte Diplomarbeit) EMI Escuela Militar de Ingeniería, La Paz,
- VACHER, J., ATTEIA, D. und IMAÑA. E. (1988): La radiación neta (RN) y la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) en el Altiplano Boliviano. In: Actas del Segundo simposio de la investigación Francesa en Bolivia ORSTOM, La Paz, 1988, S. 143-153
- VACHER, J., ATTEIA, O., IMAÑA, E., und BRASIER, E. (1988): Estudio "In Situ" del consumo de agua y de la producción de la papa para tres estaciones del altiplano boliviano. In: Actas del Segundo Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia ORSTOM, La Paz, Abril 1988, S.154-161
- VACHER, J. und GARCIA, M. (1991): Uso consuntivo y comportamiento hídrico de la papa amarga (*Solanum juzepczukii*) y de la papa dulce (*Solanum tuberosum* ssp. andígena) en el altiplano boliviano. ORSTOM: In: I. Mesa Redonda: Perú-Bolivia, La Paz, 7-8 de Mayo, Hrsg.: Rea, J. und Vacher, J.J., S. 69-76
- VACHER, J.J., FELLMANN, T., MALDONADO, R., und MENDEZ, A. (1992): Estudio comparativo de la evapotranspiración real (ETR) de la papa dulce (*solanum tuberosum* ssp. andígena) y de la papa amarga (*solanum juzepczukii*) en el altiplano boliviano. In: Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos, La Paz, Bolivia, 4-8 febrero, IBTA-ORSTOM-CII-CANADÁ. Hrsg.: Morales, D., Vacher, J.J., S.197-201
- VACHER, J., YUPANQUI, E.C., CHOQUEHUANCA, A.C., MURILLO, A.C., ZEBALLOS, C.D. (1992): Variación de la temperatura mínima en agrosistemas de camellones (Waru Waru) y pampa y su efecto en cultivos de papa, quinua y cañahua. In: Avances de Investigación sobre la tecnología de waru waru, II. Producción agrícola. Programa Interinstitucional waru waru, convenio PELT/INADE-IC/COTESU, Puno, Peru, 152 S.
- VACHER, J., LIBERMAN, M. et al. (1993): Influencia del lago en la agricultura litoral. In: El lago Titicaca. Hrsg.: Dejoux, C. und Iltis, A., Instituto Francés de Investigación Científica para el desarrollo en Cooperación ORSTOM – Hisbol, La Paz, S.83-104
- VACHER, J. (1998): Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: Significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 68, S. 99-108
- VAN REEUWIJK, L.P., Hrsg. (1993): Procedures for soil analysis. Technical paper Nr.9, ISRIC International soil reference and information centre, 19-1 S.
- VARGAS, A., IMAÑA, E., COLQUE, H. (1998): Manejo de la tecnología de Suka Kollus considerando aspectos hídricos y climatológicos. Informe Anual 1997/98, PROSUKO Programa Interinstitucional de Suka Kollus – COSUDE Cooperación Suiza al Desarrollo, 140 S.
- VERSTEEG, A.H. (1983): Raised Field Complexes and Associated Settlements in the Coastal Plain of Western Suriname. In: *Drained Field Agriculture in Central and South*

-
- America. Proceedings 44 International Congress of Americanists Manchester 1982, hrsg.v. Darch, J.P., BAR International Series 189, Oxford, S. 237-250
- VILLANUEVA, J.C., YUPANQUI, E.C. (1994): Variación de temperaturas mínimas en el gradiente vertical de los agroecosistemas en cultivo de papa. In: Microclimatología en el agroecosistema de Waru Waru. 1. Avances de Investigación. Hrsg.: Programa Interinstitucional de Waru Waru, Convenio PELT / INADE-COTESU. Puno, Peru, 133 S.
- ZUCCHI, A. (1985): Recent Evidence for pre-columbian Water Management Systems in the Western Llanos of Venezuela. In: Prehistoric Intensive agriculture in the Tropics. Ed.: Farrington, I.S., part i, Vol 1, BAR International Series 232, 434 S., S.167-180
- ZURITA, G. (1997): Composición taxonómica y abundancia poblacional de lombrices en sistemas de monocultivo y rotación de cultivos en Suka Kollus (Raised Fields). Tesis de Grado en Ciencias Biológicas (unveröffentlichte Diplomarbeit), UMSA Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 125 S.+Anexos

Curriculum Vitae

Name	Anja Stache, Dipl. - Ing. agr. / M. Sc. Agric. Fachrichtung: Internationale Agrarentwicklung
Geburtsdatum	18. Februar 1968
Geburtsort	Berlin (Wilmersdorf)
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	deutsch
Schulbildung	
08 / 1978 – 04 / 1985	Gymnasium Norf, Neuss
04 / 1985 – 11 / 1987	Deutsche Schule, La Paz, Bolivien, Abschluß: Abitur (11 / 87)
Studium	
04 / 1988 – 09 / 1988	Studium der Lateinamerikanistik, Freie Universität Berlin
10 / 1988 – 09 / 1989	Praktikum auf landwirtschaftlichem Gemischtbetrieb (100 ha), biologische Wirtschaftsweise, Hannover
10 / 1989 – 09 / 1990	Aufenthalt in Bolivien mit einem Praktikum (05 / 1990 – 06 / 1990) im LRE - Projekt: Ländliche Regionalentwicklung im Departamento Santa Cruz, Bolivien. (Nationale Entwicklungsbehörde Cordecruz - GTZ (IP)), Aufgabe: Durchführung eines Versuches zur Fermentation von Kaffee
10 / 1990 – 10 / 1992	Grundstudium Agrarwissenschaften, Georg - August - Universität, Göttingen, Vordiplom
10 / 1992 – 05 / 1996	Hauptstudium Agrarwissenschaften, Humboldt - Universität zu Berlin, Abschluß: Diplom, Fachrichtung: Internationale Agrarentwicklung
Berufserfahrung (vor und während des Promotionsstudiums)	
06 / 1996 – 08 / 1996	Junior - Berater im Projekt: "Förderung des staatlichen, ländlichen Entwicklungsfonds, Fondo de Desarrollo Campesino - GTZ" <ul style="list-style-type: none">• Unterstützung eines Experten bei der ex - post Evaluierung von landwirtschaftlichen Projekten in den Bereichen Infrastruktur, Produktionsverbesserung und Trägerförderung• Eigenverantwortliche, schriftliche Beurteilung von zwei Kleinbewässerungssystemen im ariden Süden Boliviens mit Hilfe eines vorher gemeinsam erarbeiteten Kriterienrasters: Beteiligung der Begünstigten bei der Projektplanung, Erreichen der Projektziele, Finanzierung und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen, Zusammenarbeit mit anderen Projekten, Rolle der Frauen.
03 / 1997 – 06 / 1997	Junior - Berater im Projekt: "Beratung des Nationalen Bewässerungsprogramms PRONAR in den Einzugsgebieten Río Grande, Pilcomayo und Altiplano" (Träger: Agrarministerium, Ministerio de Agricultura y Ganadería y Desarrollo Rural - GTZ):

- Entnahme und Beurteilung von Wasserproben, Unterstützung bei der Messung bodenphysikalischer Parameter (Infiltration), Mithilfe bei der Erstellung einer Prefeasibility - Studie für ein integriertes Bewässerungsmanagement im südlichen Zentraltal von Cochabamba
- Teilnahme an Aktivitäten und Versammlungen des technischen Projektteams mit den Wassernutzerorganisationen und den Durchführungsorganisationen (NGO's) von Kleinbewässerungssystemen.

07 / 1997 – 09 / 1997

Praktikantin in der Regionalabteilung, GTZ - Zentrale Eschborn, Länderbereich 3: Lateinamerika, Mahgreb, Nahost

- Unterstützung der Regionalgruppe: Nördliche Andenländer Peru, Ecuador, Kolumbien bei der Überarbeitung von Angeboten, Projektfortschritts- und Schlußberichten

12 / 1997 – 01 / 1998

Junior - Consultant in dem von der GTZ unterstützten Vorhaben: "Pufferzonenmanagement in Naturschutzgebieten", Pilotzone Chaco, Bolivien

- Eigenverantwortliche Durchführung einer internen Soll - Ist Evaluierung im Projektteam: Prüfung von Produktionstechnik, Vermarktung, sowie interner und externer Projektorganisation landwirtschaftlicher Kleinprojekte

Promotionsstudium

10 / 1997

Beginn des Promotionsstudiums bei Prof. G. Gerold, Abteilung Landschaftsökologie, Geographisches Institut, Fachbereich Geowissenschaften, Georg - August - Universität, Göttingen

10 / 1997 – 05 / 1998

Feld- und Laborarbeiten in Bolivien für die Promotion (1. Phase)

06 / 1998 – 08 / 1998

Gespräche in Göttingen mit den beteiligten Professoren über erste Ergebnisse der Untersuchungen für die Promotion

09 / 1998 – 04 / 1999

Feld- und Laborarbeiten in Bolivien für die Promotion (2. Phase)

seit 05 / 1999

Doktorandin am Geographischen Institut, Prof. G. Gerold

10 / 1999 – 03 / 2000

wissenschaftliche Hilfskraft, Abteilung Landschaftsökologie

03 / 2000 – 09 / 2000

wissenschaftliche Mitarbeiterin, Abteilung Landschaftsökologie

Göttingen, 21. 09. 2000

Anja Stache