

Einfluss von Kompostanwendung und Unterflur-Bewässerung auf die Ertragsbildung von Spargel (*Asparagus officinalis* L.)

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades einer
Doktorin der Gartenbauwissenschaften
- Dr. rer. hort. -
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. agr. Iris Schaper (geb. Ehler)
geboren am 02.10.1977 in Bremerhaven

2008

Referent: Prof. Dr. Hartmut Stützel

Korreferent: Prof. Dr. Hans-Jürgen Paschold

Tag der Promotion: 22.08.2008

Kurzfassung

Schlagwörter: Wasserversorgung, organische Düngung, Spargel

Aus kulturtechnischen Gründen wird Spargel überwiegend auf leichten, sandigen Böden mit geringer Sorptionsfähigkeit für Nährstoffe und geringer Feldkapazität angebaut. Zur Sicherstellung einer optimalen Wasserversorgung kann daher in Trockenperioden auf Zusatzbewässerung oft nicht verzichtet werden. Diese wird überwiegend in Form einer Überkopf-Bewässerung durchgeführt, die zwar kostengünstig und flexibel einsetzbar ist, jedoch eine unbefriedigende Wasserverteilung, geringe Wassereffizienz und hohe Windanfälligkeit aufweist. Unterflur-Tropfbewässerungssysteme ermöglichen eine bedarfsgerechte und gleichmäßige Wasserversorgung und vermindern Auswaschungsverluste durch geringe Fluktuationen im Bodenwassergehalt. Darüber hinaus kann die Wasserspeicherkapazität des Bodens durch den Einsatz organischer Dünger erhöht und das Risiko von Auswaschungsverlusten durch zusätzliches Sorptionspotenzial vermindert werden. Das Ziel der Untersuchungen war es zunächst, experimentell die Effekte von unterschiedlicher organischer Düngung auf die Wassernutzungseffizienz (WUE) von Spargel bei unterschiedlichen Wasserversorgungsstufen zu erfassen. Dazu wurden im Rahmen eines mehrjährigen Feldversuchs mit Unterflur-Tropfbewässerung, der im Jahr 2002 auf einer Praxisfläche in einer Spargelneupflanzung angelegt wurde, sowie zweier Gefäßversuche mit einjährigen Spargelpflanzen Untersuchungen zum Einfluss organischer Dünger (Fertigkompost, Pferdemist, Champignonkultursubstrat (Champost); Aufwandmenge je 4000 kg C/ha) auf Wachstum, Ertrag und N-Haushalt des Spargels bei einer Wasserversorgung von 50 und 85 % nFK (bzw. 50, 70 und 85 % Gefäßkapazität, GK) vorgenommen und folgende Hypothesen geprüft:

1. Zur Maximierung des Ertrages benötigt Spargel eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität und
2. Komposte steigern die WUE von Spargel mehr als der üblicherweise eingesetzte Pferdemist.

Aus dem Feldversuch ging hervor, dass bei einer Wasserversorgung von 85 % nFK gegenüber 50 % nFK Ertragssteigerungen zu erzielen sind. Bezüglich des Einflusses der Wasserversorgung auf das Wachstum von Spargel waren keine einheitlichen Effekte in den Versuchen nachweisbar. Der Einsatz von Fertigkompost steigerte gegenüber Pferdemist und Champost die WUE des Spargels in den Gefäßversuchen. Dies beruhte u. a. vermutlich auf Wachstums-

beeinträchtigungen des Spargels durch die N-immobilisierende Wirkung des strohreichen Pferdemistes bzw. phytotoxische Substanzen im Champost.

Da organische Dünger unterschiedliche und schwer abschätzbare Umsatz- und Abbauraten der C- und N-Verbindungen aufweisen und Spargel zudem nur in einem sehr kurzen Zeitraum (Juli - August) größere Mengen an Nährstoffen aufnimmt, wurden auch die Mineralisationsparameter eines Zwei-Pool-Modells wie im Modell HERMES der organischen-Dünger-Spargelboden-Gemische anhand von Langzeit-Klimakammerinkubationen bestimmt. Daraus ging hervor, dass die Kompost-Qualitätsparameter Rottegrad und C/N-Verhältnis der organischen Dünger geeignet sind, um Prognosen über das zu erwartende N-Nachlieferungsverhalten organischer Dünger unabhängig von deren Ausgangsmaterial zu liefern. Der Pferdemist wies eine N-immobilisierende Wirkung auf und der Fertigkompost zeichnete sich gegenüber dem Champost durch ein geringes Mineralisationspotenzial aus. Aufgrund der langsamen Stickstoffflüsse, die im Spargelanbau gut nutzbar sind, und relativ geringer Nährstoffgehalte ist neben der Erhöhung der WUE auch eine Verminderung des Risikos des Nitrateintrages ins Grundwasser und somit eine Verbesserung der NUE des Spargels durch den Einsatz von gütegesichertem Fertigkompost als organischer Dünger im Vergleich zu Pferdemist und Champost zu erwarten.

Da im Feldversuch Beeinträchtigungen des Kronenwachstums auftraten, wurde in 2004 ein dritter Gefäßversuch durchgeführt, um den Einfluss von Unterflur- im Vergleich zu Überflur-Tropfbewässerung auf den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen zu untersuchen und folgende zwei Hypothesen zu prüfen:

1. Der Applikationsort des Wassers (über- und unterflur) beeinflusste die Wasseraufnahme und damit das Kronen- und Rhizomwachstum von Spargel und
2. Wasserapplikation in unmittelbarer Nähe zum Rhizom beeinträchtigte dessen Wachstum und damit die Bildung neuer Speicherwurzeln.

Die erste Hypothese konnte bezüglich des Kronenwachstums bestätigt werden. Zur Bestätigung der zweiten These reichten die Ergebnisse nicht aus. Da die Unterflur- gegenüber der Überflur-Tropfbewässerung aus nicht abschließend geklärten Ursachen aber Wachstumsbeeinträchtigungen bei den Spargelpflanzen hervorrief, ging die Überflur-Tropfbewässerung als optimales Tropfbewässerungssystem für den Spargelanbau aus den Untersuchungen hervor.

Abstract

Iris Schaper: Influence of compost application and subsurface irrigation on yield formation of asparagus (*Asparagus officinalis* L.)

Keywords: Water supply, organic fertilization, asparagus

For reasons of technical cultivation, asparagus is cultivated predominantly on light, sandy soils with low sorption ability for nutrients and with small field capacity. Thus in dry periods auxiliary irrigation is often needed to ensure an optimal water supply. The auxiliary irrigation is predominantly done by overhead irrigation, which is economical and can be used in multiple ways, but which shows an unsatisfactory water dispersion, a low water efficiency and a high wind susceptibility. Subsurface drip irrigation systems guarantee an even coverage that is adapted to the demand and reduce leaching losses thanks to low fluctuations in soil water content. In addition to that the soil water holding capacity can be increased by the use of organic fertilizers and the risk of leaching losses can be decreased thanks to additional sorption potential. The objective of the experimental investigations was to examine the effects of various organic fertilizers on the water use efficiency (WUE) of asparagus at different irrigation levels. For this purpose the effects of different organic fertilizers (mature compost, horse manure, non-mature spent mushroom compost; application rate of 4000 kg C/ha in each case) on growth, spear yield and nitrogen balance of asparagus at irrigation levels of 50 and 85 % of available field capacity (AFC) (or 50, 70 and 85 % pot capacity (PC)) were investigated in a perennial field experiment with subsurface drip irrigation, which was started in 2002 under local farming conditions, and in two pot experiments with one-year-old asparagus plants. The following hypotheses were tested:

1. To maximize the spear yield asparagus needs a water supply close to the field capacity and
2. Composts increase the WUE of asparagus in a more significant way than the usually used horse manure.

The field experiment revealed that yield increases can be obtained at an irrigation level of 85 % AFC in opposition to an irrigation level of 50 % AFC. In the experiments the influence of the water supply on the growth of asparagus was not homogeneous enough to be proven. In opposition to horse manure and spent mushroom compost (SMC) the use of mature compost in the pot

experiments increased the WUE of asparagus. Among other things this is probably due to the nitrogen immobilization effect of the horse manure, which is composed of a great amount of straw, and/or to phytotoxic substances in the SMC that have adverse effects on the growth of asparagus. Since the C- and N-compounds of organic fertilizers have different conversion and decomposition rates that can not easily be estimated and due to the fact that there is only a very short period (July - August) in which asparagus takes up large quantities of nutrients, the mineralization parameters of a two-pool model were as well determined on the basis of long-term laboratory incubations as in the HERMES model of the organic-fertilizer-soil-mixtures. It turned out that the compost-quality-parameters, the stage of maturity and the C/N ratio of the organic fertilizers, can be of use to make predictions on the nitrogen mineralization of organic fertilizers regardless of their composition. The horse manure had an N-immobilizing effect and the mature compost had, in opposition to the SMC, a low mineralization potential. The use of high-quality mature compost as organic fertilizer instead of horse manure or SMC, probably results, due to the slow nitrogen flux of mature compost, which is of advantage in the cultivation of asparagus, and due to its relatively low nutrient contents, in an increase of the WUE as well as in a reduction of the risk of nitrate input to the groundwater and thus in an improvement of the NUE of asparagus.

Since adverse effects on the crown growth appeared during the field experiment, a third pot experiment was conducted in 2004 in order to analyse the influence of subsurface and surface drip irrigation on the water regime of one-year-old asparagus plants and in order to test the following two hypotheses:

1. The location of the water application (subsurface and surface) affected the water absorption and therewith the crown and rhizome growth of the asparagus and
2. Water application in proximity to the rhizome compromised its growth and thus the formation of new storage roots.

The first hypothesis concerning the crown growth was confirmed. The results were insufficient to confirm the second thesis. Since the subsurface irrigation, in opposition to the surface irrigation, caused growth impairments, due to reasons not entirely determined yet, the surface drip irrigation turned out to be the optimal drip irrigation system for the cultivation of asparagus.

1	Einleitung	1
2	Kenntnisstand und Problemstellung	2
2.1	Grundlagen der Morphologie und Entwicklung von Spargel.....	2
2.2	Der Kohlenstoffhaushalt von Spargel	4
2.2.1	Das Leistungsvermögen des Photosyntheseapparates	4
2.2.2	Der Assimilathaushalt	11
2.3	Der Wasser- und Stickstoffhaushalt von Spargel	14
2.3.1	Adaptionen von Spargel an Trockenstress	14
2.3.2	Wasser- und Humusversorgung im Spargelanbau	15
2.4	Lösungsansätze zur Erhöhung der Wasser (WUE)- und Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) im Spargelanbau.....	18
2.5	Zielsetzung	21
3	Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf Wachstum und Ertrag von Spargel	23
3.1	Einführung	24
3.2	Material & Methoden	26
3.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	26
3.2.2	Versuchsauswertung	27
3.3	Ergebnisse	31
3.3.1	Gefäßversuche	31
3.3.2	Feldversuche	35
3.4	Diskussion	40
3.4.1	Wassereffekte bei Spargel.....	40
3.4.2	Komposteffekte bei Spargel.....	42
3.4.3	Validität der ermittelten Effekte	43
3.5	Schlussfolgerungen.....	47
4	Einfluss von Unterflur-Bewässerung auf den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen	48
4.1	Einführung	49
4.2	Material & Methoden	51
4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	51
4.2.2	Versuchsauswertung	52
4.3	Ergebnisse	55

4.3.1	Wasserangebot und -aufnahme	55
4.3.2	Produktivität des Wassereinsatzes	56
4.3.3	Wasserhaushalt der Spargelpflanzen	59
4.4	Diskussion	61
4.4.1	Einfluss von Unterflur-Bewässerung auf das Wachstum einjähriger Spargelpflanzen	61
4.4.2	Validität der ermittelten Effekte	64
4.5	Schlussfolgerungen	66
5	N-Mineralisationskinetik organischer Dünger in sandigem Spargelboden.....	67
5.1	Einführung	68
5.2	Material & Methoden.....	70
5.2.1	Organische Dünger	70
5.2.2	Spargelboden und Substratgemische	70
5.2.3	Bodenanalysen	71
5.2.4	Inkubation.....	71
5.2.5	Parameterschätzung	72
5.2.6	Inkubation in situ	74
5.2.7	Statistische Auswertung.....	75
5.3	Ergebnisse.....	76
5.3.1	Kumulierte N-Nettomineralisations-Modelle der Substrate.....	76
5.3.2	Parameterschätzung für verschiedene organische Dünger mit Zwei- Pool-Modellansätzen.....	77
5.3.3	Parameterschätzung für verschiedene organische Dünger mit Ein- Pool-Modellansatz.....	81
5.3.4	Simulation der N-Mineralisation unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld mit Hilfe der in vitro ermittelten N-Minerali- sationskinetik der Substratgemische und Vergleich mit in situ gemessener N-Mineralisation.....	83
5.4	Diskussion	86
5.4.1	Einfluss des C/N-Verhältnisses und Rottegrades organischer Dünger auf deren Mineralisationspotenzial und -geschwindigkeit.....	86
5.4.2	Validität der ermittelten Mineralisationspotenziale	88
5.5	Schlussfolgerungen	91

6	Abschließende Betrachtung.....	93
7	Literaturverzeichnis	98
8	Anhang	107

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Atom-Adsorptions-Spektralphotometer
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
Arrh.	Arrhenius
A_{sat}	Photosynthesekapazität in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
BioAbfV	Bioabfallverordnung
Champost	Champignonkultursubstrat
Chl	Chlorophyll
c_i	interzelluläre CO_2 -Konzentration in $\mu\text{mol mol}^{-1}$
c_a	CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft in $\mu\text{mol mol}^{-1}$
CK	Champignonkultursubstrat, Champost
CKW	Chlorierte Kohlenwasserstoffe
C/N	Verhältnis aus Gesamt-Kohlenstoff- und Gesamt-Stickstoffgehalt
C_{org}	organisch gebundener Kohlenstoff
C_t	Gesamtkohlenstoffgehalt
d_B	Lagerungsdichte des Bodens in g/cm^3
dt	Dezitonne = 100 kg
E	Transpirationsrate in $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
ET	Evapotranspiration
F	Anteil der organischen Dünger an N_{fast}
FK 02, 03	Fertigkompost
FM	Frischmasse
FriKo	Frischkompost
FV	Feldversuch
GD	Grenzdifferenz
GK	Gefäßkapazität
Gl.	Gleichung
g_s	stomatäre Leitfähigkeit in $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
GV	Gefäßversuch
J_{max}	maximale Elektronentransportrate in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
k_{fast}	(Mobilisations-) Ratenkonstante von N_{fast}
Klika	Klimakammer
$k_{\text{one-pool}}$	(Mobilisations-) Ratenkonstante von $N_{\text{one-pool}}$
k_{slow}	(Mobilisations-) Ratenkonstante von N_{slow}
LAR	Leaf Area Ratio, Blattflächenverhältnis, Verhältnis der Blattfläche zur Pflanzenmasse
L_{stom}	relative stomatäre Limitierung in %
n. b.	nicht bestimmt
N_{fast}	schnell abbaubarer N-Pool
nFK	nutzbare Feldkapazität
N_{min}	Mineralischer Stickstoff, Summe aus Ammonium- und Nitrat-N
$N_{\text{one-pool}}$	Mineralisationspotenzial bei einfach-exponentiellem Modellansatz

N _{org}	organisch gebundener Stickstoff
N _{slow}	langsam abbaubarer N-Pool
N _t	Gesamtstickstoffgehalt, Summe aus organisch gebundenem und Mineralstickstoff
NUE	Nitrogen Use Efficiency, Stickstoffnutzungseffizienz
Org. Subst.	Organische Substanz
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
Parz.	Parzelle
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxin / Dibenzofuran
Pfl.	Pflanze
Phyllokl.	Phyllokladien
PM	Pferdemist
PPFD _{comp}	Lichtkompensationspunkt in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
r _{cx}	Carboxylierungswierstand
Rd	Dunkelrespirationsrate in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
r _s	Stomatawiderstand
Rubisco	Ribulose-1,5-Bisphosphat-Carboxylase / Oxigenase
S	Anteil der organischen Dünger an N _{slow}
SLW	Specific Leaf Weight, Spezifisches Blatt- bzw. Phyllokladien- gewicht
SPS	Saccharosephosphatsynthetase
Stdj.	Standjahr
Symb.	Symbol
TDR	Time-Domain-Reflectometrie
TE	TCDD-Toxizitätsäquivalente laut AbfklärV
TM	Trockenmasse
TNC	Total Non-Structural Carbohydrate, Nicht-Struktur-Kohlenhydrate
TS	Trockensubstanz
V _{cm_{ax}}	maximale Carboxylierungsrate in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Vol.-%	Volumenprozent
Vol. gew.	Volumengewicht
VPD	Vapor Pressure Deficit, Sättigungsdefizit der Luft in hPa
WFL	Wuchsleistungsfaktor
WK	Wasserkapazität
WKD	Wasserkapazität der Durchwurzelungstiefe
WUE	Water Use Efficiency, Wassernutzungseffizienz

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Merkmale des Kohlenstoffhaushaltes von Spargel (Originalwerte teilweise mit Daten aus anderer Literatur umgerechnet, um Vergleichbarkeit herzustellen).....	8
Tab. 3.1:	Faktoren und Stufen in den Feld- und Gefäßversuchen.....	26
Tab. 3.2:	Übersicht über Aufbau und Durchführung der Versuche	26
Tab. 3.3:	Termine, Mess- und Probengröße der Pflanzenuntersuchungen	28
Tab. 3.4:	Evapotranspiration, TM-Zuwächse und Wassernutzungseffizienz (WUE) der Spargelpflanzen im GV 02 und GV 03, Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	34
Tab. 3.5:	Pflanzenmassen (g TM/Pfl.) im GV 02 und GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	34
Tab. 3.6:	N-Gehalte in der Pflanzenmasse im GV 02 und GV 03 und N-Akkumulation in den Pflanzen im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$).....	35
Tab. 3.7:	Wasserbilanz (01.05. - 10.09.) und -nutzungseffizienz (WUE) der Spargelpflanzen im 1. und 2. Standjahr von FV 02-04, Mittelwerte über organische Düngung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$).....	36
Tab. 3.8:	Pflanzentrockenmassen (g TM/Pfl.) und N-Gehalte im Aufwuchs (% in TM) im September des 1. und 2. Standjahres im FV 02-04; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$).....	37
Tab. 3.9:	Erntemengen, mittleres Stangengewicht und Anteil der HKI Extra am Ertrag im FV 02-04 im 2. und 3. Standjahr (Stdj.), Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	39
Tab. 4.1:	Bedingungen für Photosynthese-Messreihen.....	54
Tab. 4.2:	Pflanzenparameter des Spargels im GV 04 bei Endauswertung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$).....	59
Tab. 4.3:	Photosynthesekapazität und Transpirationsrate sowie stomatäre Leitfähigkeit und spezifisches Blattgewicht im GV 04 am 12. und 19. August 04, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)	60
Tab. 4.4:	Nährstoffgehalte der Pflanzen (% in TM) im GV 04 bei Endauswertung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	60

Tab. 5.1:	Chemische und biologische Eigenschaften der organischen Dünger.....	70
Tab. 5.2:	Physikalische und chemische Eigenschaften des Spargelbodens und der Substratgemische mit organischer Düngung	71
Tab. 5.3:	Durch Anwendung der grafischen Methode nach Nordmeyer (1985) ermittelte Schätzwerte für N_{fast} (kg N/ha) und durch Anpassung von Gl. 1 an die experimentellen Daten verschiedener Boden-Organischer-Dünger-Gemische gewonnenen Schätzwerte für N_{slow} (kg N/ha).....	78
Tab. 5.4:	Lineare Zusammenhänge zwischen N_{fast} sowie F und dem C/N-Verhältnis bzw. S und dem Rottegrad der organischen Dünger (F = Anteil der organischen Dünger an N_{fast} , S = Anteil der organischen Dünger an N_{slow})	79
Tab. 5.5:	Lineare und exponentielle Zusammenhänge zwischen verschiedenen Mineralisationsparametern und dem Rottegrad bzw. C/N-Verhältnis der organischen Dünger bei Verwendung einer einfachen Mineralisationsgleichung mit einem N-Pool.....	83
Tab. 5.6:	Stickstoffbilanz (kg N/ha) im Feldversuch (FV 02-04) im 2. Standjahr (2003); Mittelwerte über Wasserstufen	85
Tab. 8.1:	Chemische und physikalische Eigenschaften der organischen Dünger	107
Tab. 8.2:	Aufwandmengen und Nährstofffrachten (kg/ha) der organischen Dünger in den Feld- und Gefäßversuchen.....	108
Tab. 8.3:	Nährstoffgehalte der Substrate in GV 02 und Klika 02 zu Versuchsbeginn (28.03.02) und Zuordnung zu Bodenengehaltsklassen*	108
Tab. 8.4:	Nährstoffgehalte im Boden im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	109
Tab. 8.5:	Nährstoffgehalte der Substrate in GV 03 und GV 04 zu Versuchsbeginn am 01.04.03 bzw. 01.07.04 und Zuordnung zu Bodenengehaltsklassen*	109
Tab. 8.6:	Nährstoffgehalte im Boden im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	109
Tab. 8.7:	Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	110
Tab. 8.8:	Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (g/Pfl. bzw. Pflanzenteil) im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$), bei N-, Ca-, Mg- und P-Akkumulation in den Kronen sowie N- und P-Akkumulation in den	

	Gesamtpflanzen lagen Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren vor	110
Tab. 8.9:	Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	111
Tab. 8.10:	Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (g/Pfl. bzw. Pflanzenteil) im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	111
Tab. 8.11:	Nährstoffgehalte im FV 02-04 in den Bodentiefen 0-30 cm und 30-60 cm in Spargelreihe und Zwischenreihenbereich (Weg) und Zuordnung zu Bodengehaltsklassen*; Mittelwerte über alle Parzellen	112
Tab. 8.12:	Nährstoffgehalte im FV 00-04 in 0-30 cm Bodentiefe und Zuordnung zu Bodengehaltsklassen*; Mittelwerte über alle Parzellen	112
Tab. 8.13:	Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im FV 02-04 im September des 1. und 2. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)	114
Tab. 8.14:	Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (kg/ha) im FV 02-04 im September des 1. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)	114
Tab. 8.15:	Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (kg/ha) im FV 02-04 im September des 2. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)	115
Tab. 8.16:	Kohlenhydratgehalte (% Brix) und -reserven (mg $\text{CH}_2\text{O/g}$ TM) in den Speicherwurzeln im FV 02-04 im November des 2. sowie April und Mai des 3. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$).	115

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 3.1:** Aktuelle Evapotranspiration (ET) des Spargels (l/Gefäß) im GV 03 (a) und GV 02 (b) (Mittelwerte über organische Düngung und N-Stufen) und Referenz-ET eines Spargelbestandes (mm/d) im 1. Standjahr (jeweils Wochenmittel), Beziehung zwischen dem Sättigungsdefizit der Luft und dem Kronen/Aufwuchs-Verhältnis von Spargel aus drei Gefäßversuchen (c) (jeweils Mittelwerte aller Varianten) und Wechselwirkungen zwischen Versuchsfaktoren bei N-Akkumulation in der Gesamtpflanzenmasse (d) sowie Gesamtpflanzen- und Kronen-TM (e) im GV 02 bei Endauswertung..... 33
- Abb. 3.2:** Niederschlag und Unterflur-Tropf- bzw. Überkopfbewässerung im FV 02-04 von Mai bis August im 1. (a) und 2. (b) Standjahr im Vergleich zur Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes in den gleichen Zeiträumen, kumulierte Triebblängen pro Pflanze im 2. Standjahr (c), Rohertrag, mittleres Stangengewicht (d) und prozentualer Anteil der Handelsklassen am Ertrag (e) im FV 00-04 im 7. und 8. Standjahr und Mittelwerte der Bodenwassergehalte der Varianten aus 22 Messungen mit TDR-Sonden von Mai bis Sept. 03 im FV 02-04 (f), in a - e Mittelwerte über organische Düngung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) 38
- Abb. 4.1:** Versuchsaufbau von GV 04 54
- Abb. 4.2:** Aktuelle Evapotranspiration (ET) des Spargels im GV 04 (l/Gefäß) bei drei Applikationstiefen und Referenz-ET eines Spargelbestandes (mm/d) im 1. Standjahr; (1. Pfeil: Erweiterung der für die Bewässerung relevanten Durchwurzelungstiefe auf 70 cm, 2. Pfeil: Anpassung der Bewässerung an Durchwurzelungstiefe von 100 cm, Erhöhung der Wasserversorgung auf 80 % WKD) (a) sowie Wasseraufnahme des Spargels aus verschiedenen Bodenschichten bei Überflur- (b) und Unterflur-Tropfbewässerung in 25 (c) und 40 cm (d) Bodentiefe während der Vegetationsperiode im GV 04 (a - d jeweils Wochenmittel, b - d gestapelte Kurven) 55
- Abb. 4.3:** Beziehungen zwischen Faserwurzeldichte und Wasseraufnahme der Spargelpflanzen (a) sowie Anzahl Speicherwurzeln und Faserwurzeldichte (Mittelwerte der Varianten) (b) im Bereich der Wurzelbeobachtungsröhren (40, 70 und 100 cm Bodentiefe), Wurzeldichte im Bodenhorizont am 18. Okt. und 15. Nov. (c), Verteilung der Längendichte der Speicherwurzeln bei Endauswertung (d) 57
- Abb. 4.4:** Wuchsleistungsfaktor (WLF) und TM-Entwicklung des Aufwuchses während der Vegetationszeit (a), Beziehung zwischen WLF und Aufwuchs-TM bei Endauswertung (b), Wassernutzungseffizienz (WUE) (c), Verlauf des Wasserpotenzials der Pflanzen (Ψ_{Xylem}) und Sättigungsdefizits der Luft (VPD) am 11.-12.08. (d) und 18.-19.08.04 (e), sowie Beziehung zwischen VPD und Ψ_{Xylem} im GV 04 (f), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) 58

- Abb. 5.1:** Grafische Darstellung der Temperaturfunktionen Arrhenius nach Nordmeyer & Richter (1985) (a) sowie ‚Best fit‘ (b) und Arrhenius (c) nach Heumann & Böttcher (2004) für k_{fast} und k_{slow} 73
- Abb. 5.2:** Kumulierte N-Nettomineralisation der Substrate bei 10 (a) und 20 °C (b), Angaben für eine 30 cm mächtige Bodenschicht bei 1.4 g/cm³; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede 76
- Abb. 5.3:** Grafische Bestimmung des Parameters N_{fast} anhand der Mineralisationsverläufe nach Nordmeyer (1985); Dabei wird der zweite Teil des Mineralisationsverlaufes bei 20 °C (ab 4 - 5 Halbwertszeiten) vereinfacht als eine lineare Funktion dargestellt und die Gerade bis zur Ordinate verlängert. Der Schnittpunkt mit der Ordinate stellt den Schätzwert für die N_{fast} -Fraktion dar. 77
- Abb. 5.4:** Lineare Beziehungen von N_{fast} und F zum C/N-Verhältnis (a) bzw. S zum Rottegrad (b) der organischen Dünger (F = Anteil der organischen Dünger an N_{fast} , S = Anteil der organischen Dünger an N_{slow}) sowie die Gegenüberstellung der gemessenen kumulierten Nettomineralisation aus den organischen Düngern mit der geschätzten bei 20 °C (c, e) und 10 °C (d, f) (bei 10 °C k_{fast} - und k_{slow} -Werte aus den Modellansätzen und die bei 20 °C ermittelten N_{fast} - und N_{slow} -Werte vorgegeben). In e, f nur ‚Best fit‘-Modell nach Heumann & Böttcher (2004) abgebildet..... 80
- Abb. 5.5:** Beziehungen der Mineralisationsparameter $N_{one-pool}$ (a) und $k_{one-pool}$ bei 10 und 20 °C (b) zum Rottegrad der organischen Dünger (Vergleichswerte der Kontrolle markiert) sowie Beziehungen der Arrheniuskonstanten a und b (Gl. 2) zum C/N-Verhältnis der organischen Dünger (c) 82
- Abb. 5.6:-** Simulation der kumulierten N-Nettomineralisation der Substratgemische FK 02 (a), PM 02 (b) und CK (c) sowie der Kontrolle (d) unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld vom 1.4.2002 - 3.6.2004 mit Hilfe der nach Nordmeyer & Richter (1985) und Heumann & Böttcher (2004) ermittelten Parameterschätzwerte (vgl. Abb. 5.1, Tab. 5.3). Im Vergleich dazu ist die im Fuhrberger Feld im gleichen Zeitraum in situ in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) gemessene N-Mineralisation dargestellt.84
- Abb. 8.1:** Anteil der Schwermetallgehalte der organischen Dünger an den Schwermetallhöchstgrenzen in § 4, Abs. 3, Satz 2 BioAbfV (%)108
- Abb. 8.2:** Zeitlicher Verlauf der N_{min} -Werte (kg/ha) im FV 02-04 als Mittelwerte über Wasserstufen (0-90 cm) (a) und organischer Düngung (0-30, 30-60, 60-90 cm Bodentiefe) in Spargelreihen (b) und Zwischenreihenbereich (c), sowie im FV 00-04 (Mittelwerte über Aufwandmengen) (0-90 cm) (d); keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$), Pfeile kennzeichnen Termine der Mineral-N-Düngung. ... 113

1 Einleitung

Neben der Fläche wird weltweit der Wasserverbrauch als Bezugsgröße zum Ertrag und die damit verbundenen Kosten immer wichtiger. Wasser ist trotz des global großen Angebots in weiten Teilen der Erde eine knappe und den Pflanzenbau begrenzende Größe. Etwa $\frac{2}{3}$ des weltweit verfügbaren Süßwassers wird in der Landwirtschaft verbraucht, wobei ca. 60 % durch ineffiziente Bewässerung verloren geht (Anonym, 2001b). 2001 wurden ca. 40 % der weltweit produzierten Nahrungsmittel mit Zusatzbewässerung hergestellt (Anonym, 2001b). Der Spargelanbau (*Asparagus officinalis* L.) hat sich in den letzten Jahren stark ausgeweitet (Benson, 1999). Im Jahr 2001 betrug die Anbaufläche nach Schätzungen von Benson (2002) weltweit rund 251000 ha, wovon ca. 60000 ha in Europa lagen. Mit einer Ertragsfläche von etwa 13000 ha nimmt der Spargel 16.2 % der Gemüseanbaufläche in Deutschland ein und ist damit die anbaustärkste Gemüsekultur Deutschlands (Gurrath, 2002). Seit 1992 nahmen die Ertragsflächen in Deutschland um über 50 % zu (Behr, 2001; Behrendt, 2002).

Auch im Spargelanbau (*Asparagus officinalis* L.) wird mit den praxisüblichen Beregnungsmaschinen ein Bewässerungssystem mit spezifischen Problemen in der Anwendung, wie etwa unbefriedigende Wasserverteilung, geringe Wassereffizienz und hohe Windanfälligkeit eingesetzt. Dies kann auf leichten Sandböden, die typisch für den Spargelanbau sind, unter ungünstigen Bedingungen die Versickerung großer Wassermengen zur Folge haben. Damit steigt auch die Auswaschungsgefahr für löslichen Nitratstickstoff.

Die steigende Bedeutung des Spargelanbaus sowie die Schonung der Wasser- und Nährstoffressourcen erfordern daher einen effizienteren Einsatz des Beregnungswassers bei gleichzeitiger Sicherung des Ertragsniveaus. Mit über- oder unterflurig verlegten Tropfbewässerungssystemen können kleine Wassergaben in hoher Frequenz gegeben werden, wodurch große Fluktuationen im Bodenwassergehalt und Auswaschungsverluste vermieden werden können. Zudem kann organische Düngung die Wasserspeicherkapazität des Bodens positiv beeinflussen. Mit dem Ziel, die Wasser- und Stickstoffnutzungseffizienz des Spargels durch einen umweltgerechten Einsatz von Wasser und organischer Düngung zu erhöhen, wurden Untersuchungen zu Wachstum, Ertrag, N-Dynamik und -haushalt von Spargel in Abhängigkeit von Wasserversorgung und organischer Düngung durchgeführt.

2 Kenntnisstand und Problemstellung

2.1 Grundlagen der Morphologie und Entwicklung von Spargel

Spargel, *Asparagus officinalis* L., gehört in die Klasse der Monocotyledoneae (Einkeimblättrige) zur Familie der Asparagaceae und ist ein Rhizomgeophyt. Sein Ursprungsgebiet wird in den Salzsteppen Osteuropas und Vorderasiens vermutet.

Der Assimilationsapparat des Spargels setzt sich zusammen aus Haupt- und Seitentrieben sowie den 1 - 3 cm langen und bis zu 1 mm dicken Kurztrieben (Hills, 1986), den Phyllokladien. Durchschnittlich sieben zylindrische Phyllokladien wachsen pro Knoten aus den Blattachsen von Seitensprossen büschelartig in viele Richtungen (Hills, 1986). Die Assimilationsprodukte aus dem Kraut werden schon während der Krautwachstumsphase in die Wurzelkrone, das unterirdische Speichersystem für Kohlenhydrate, Mineralstoffe, Proteine u. a., verlagert (Martin & Hartmann, 1990). Die Wurzelkronen der Spargelpflanzen bestehen aus dem Rhizom, einer waagrecht wachsenden Sprossachse mit extrem kurzen Internodien, Knospen und Niederblättern, sowie Speicher- und Saugwurzeln (Billau, 1986). Ab August leiten abnehmende Temperaturen (≤ 15 °C) (Krug, 1999b) die Krautreife und damit die verstärkte Verlagerung von N, P, K, Mg und Assimilaten aus dem Kraut in die Wurzelkrone ein. Nach dem Abschlegen des vergilbten abgestorbenen Krautes im November / Dezember geht der Spargel in eine Ruheperiode über.

Die im Frühling aus den Ruheknospen austreibenden Spargelstangen werden ab dem zweiten Standjahr über zwei bis drei und ab dem dritten über sechs bis acht Wochen geerntet. Da die Organe der Monocotyledonen nicht zum sekundären Dickenwachstum befähigt sind, entscheidet die Stärke einer Knospe über die Stärke des Triebes und damit über die Qualität des Ernteproduktes (Billau, 1986). In der Phase des Stangenwachstums bzw. der Krautetablierung werden die Kohlenhydratreserven der Speicherwurzeln zur Trieb- und Phyllokladienbildung mobilisiert, was zu einem Rückgang des Wurzelgewichts führt (Drost & Wilson, 2002). Die Mobilisierungsvorgänge kehren sich in Rückverlagerungsvorgänge um, sobald die vollentwickelten Phyllokladien Assimilate produzieren (Guo et al., 2002c; Martin & Hartmann, 1990). Mit Beginn der Rückverlagerungsvorgänge sowie der Wasser- und Nährstoffaufnahme setzt das Wurzelwachstum ein, das bis zum Eintreten der Ruheperiode anhält (Krug et al., 1993;

Drost & Wilson, 2002). Zwischen der Größe der Krone und der Anzahl der Triebe sowie der Blattfläche (Phyllokladien) bestehen enge Korrelationen (Benson & Takatori, 1980).

Das Ertragspotenzial einer Pflanze wird somit direkt von den remobilisierbaren Kohlenhydratreserven der Krone bestimmt (Downton & Törökfalvy, 1975; Guo et al., 2001). Die Kohlenhydratreserven sind vom Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln und der Gesamtwurzelmasse abhängig (Woolley et al., 1999; Guo et al., 2002a). Da die Kohlenhydratreserven das Ergebnis der Assimilatproduktion und -verlagerung des Krautes aus dem Vorjahr darstellen, besteht ein indirekter Einfluss des Krautwachstums auf den Ertrag (Benson & Takatori, 1980; Downton & Törökfalvy, 1975; Guo et al., 2001).

2.2 Der Kohlenstoffhaushalt von Spargel

2.2.1 Das Leistungsvermögen des Photosyntheseapparates

Der Ertrag von Spargel nimmt mit dem CO₂-Gewinn zu und korreliert daher mit dem Nettophotosynthesevermögen (Benson & Takatori, 1980; Faville et al., 1999b; Guo et al., 2002c; Woolley et al., 1996).

Die Grundlage der Stoffproduktion eines Bestandes bildet die Blattfläche. Das Blattflächenverhältnis (Leaf Area Ratio, LAR) gibt das Verhältnis der Blattfläche (Phyllokladien und Seitentriebe $\varnothing < 1.5$ mm) zur Gesamtpflanzen-Trockenmasse an. Bei Spargel sinkt es innerhalb der ersten 14 Wochen nach der Keimung von 120 - 130 cm² g⁻¹ auf 40 - 50 cm² g⁻¹ (Benson & Takatori, 1980). In Untersuchungen von Boogaard et al. (1996) schwankte die LAR 22 Tage alter Weizenpflanzen in Abhängigkeit von der Sorte zwischen 99 - 127 cm² g⁻¹.

Spargel weist in Abhängigkeit vom Phyllokladiendurchmesser ein spezifisches Blattgewicht (Specific Leaf Weight, SLW) von 2.18 - 2.47 mg cm⁻² auf (Guo et al., 2002c), das typisch für schwachlichtangepasste Blätter anderer C₃-Arten ist (Poorter & Evans, 1998). Im Vergleich dazu wiesen die jungen Weizenpflanzen in den Untersuchungen von Boogaard et al. (1996) ein SLW von 3.55 - 4.33 mg cm⁻² auf. Da der Gehalt an biochemischen Komponenten der Photosynthese pro Blattflächeneinheit mit zunehmendem SLW bzw. Phyllokladiendurchmesser ansteigt, besteht eine positive Korrelation zwischen SLW bzw. Phyllokladiendurchmesser zur zweiten Komponente der Stoffproduktion, der **Photosyntheserate der Blattflächeneinheit** (Faville et al., 1999a,b; Guo et al., 2002c). Genotypische Unterschiede im Phyllokladiendurchmesser und dem Verhältnis von Phyllokladienvolumen zu Fläche sowie der Photosynthesekapazität konnten von Faville et al., (1999a), Guo et al. (2002c) sowie Bai & Kelly (1999) nachgewiesen werden.

Im Vergleich zu jungen Weizenpflanzen, die 20 - 40 Tage nach der Keimung eine lichtgesättigte **Nettophotosynthesekapazität** (A_{sat}) um 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aufweisen können (Boogaard et al., 1996; Ulman et al., 2000), ist A_{sat} von Spargel mit Werten $< 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ relativ niedrig (Tab. 2.1) und sinkt mit zunehmender Seneszenz der Phyllokladien und abnehmendem Chlorophyllgehalt (Guo et al., 2002c). Die höchsten Photosyntheseraten treten in der Zeit des größten Kohlenhydratbedarfs der entleerten Speicherwurzeln nach Beendigung der Krautetablierungsphase Ende Juli auf (Bai & Kelly, 1999). Tageshöchstwer-

te werden in der Zeit von 10 - 14 Uhr erreicht (Bai & Kelly, 1999; Guo et al., 2002c). Die chlorophyllhaltigen Haupt- und Seitentriebe erreichen lediglich 0 - 3 bzw. 30 % der Nettphotosyntheserate der Phyllokladien (Inagaki et al., 1989). Die Dunkelatmung von Spargel ist mit Werten $< 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tab. 2.1) ebenso wie das SLW und die Photosynthesekapazität mit Schattenpflanzen vergleichbar (Hills, 1986; Poorter & Evans, 1998). In Untersuchungen von Ulman et al. (2000) lag die Dunkelatmung von Weizen in gleicher Größenordnung.

Das Photosynthesevermögen ändert sich im Zuge der Entwicklung fortlaufend. Unter natürlichen Bedingungen wird die Intensität der Photosynthese eines Blattes durch eine Vielzahl äußerer und innerer (organismuseigener) Faktoren beeinflusst.

Einfluss von Außenfaktoren auf die Photosynthese

Hills (1986) fand im Vergleich zu anderen Autoren relativ niedrige **Lichtkompensations- und -sättigungspunkte** (Tab. 2.1), die er als weitere Indizien zur Einstufung des Spargels als Schattenpflanze heranzog. Während Ulman et al. (2000) auch für junge Weizenpflanzen, wie Hills (1986) bei Spargel, einen Lichtkompensationspunkt bei ca. $18 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fand, war der Lichtsättigungspunkt des Weizens mit Werten im Bereich von 800 - 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ deutlich höher als bei Hills (1986), aber vergleichbar mit Angaben von Inagaki et al. (1989) für das frühe und mittlere Entwicklungsstadium von Spargel. In Untersuchungen von Guo et al. (2002a) führte eine 80 %ige Beschattung des Spargels über eine Vegetationsperiode zu einer deutlichen Reduktion der Triebhöhe und -durchmesser sowie des Kohlenhydratgehaltes in den Speicherwurzeln.

Unter Lichtsättigung und optimalen Temperaturen weist Spargel mit 131 - 173 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Tab. 2.1) einen relativ hohen **CO₂-Kompensationspunkt** (Γ) auf, der auf eine niedrige Affinität des CO₂-fixierenden Systems für CO₂ schließen lässt. Im Vergleich dazu wies junger Weizen in Untersuchungen von Ulman et al. (2000) Werte um 35 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ auf. Die Assimilationsleistung von Spargel steigt mit zunehmender CO₂-Zufuhr bis zu einem Sättigungspunkt, der in der Literatur nicht einheitlich ist.

Das **Temperaturoptimum** von Spargel bei der Assimilation war bei Inagaki et al. (1989) nicht ausgeprägt (Tab. 2.1). In Untersuchungen von Woolley et al. (1996) hatte eine Tag/Nacht-Temperatur von 35/15 °C gegenüber 20/20 °C die

Abnahme der Assimilation und die Zunahme der Dunkel- und Lichtatmung zur Folge. Gegenüber einer Inkubationstemperatur von 20 °C fand Krug (1999a) bei 15, 25 und 30 °C eine Abnahme von Aufwuchsmasse und Trieblänge.

Der Einfluss der **Mineralstoffversorgung** der Pflanze auf die Photosynthese und Atmung ist vielfältig. Als wesentlicher Bestandteil der Proteine und des Chlorophylls ist Stickstoff am Aufbau der Thylakoid- und Enzymstrukturen beteiligt. Der Chlorophyllgehalt der Phyllokladien ist das Maß für den Gehalt photosynthetischer Reaktionszentren (Faville et al., 1999b). Beide Parameter, Chlorophyll- und Stickstoffgehalt, nehmen mit dem Phyllokladiendurchmesser zu und korrelieren positiv mit der A_{sat} von Spargel (Faville et al., 1999b). Der Chlorophyllgehalt steigt mit zunehmendem Alter an, erreicht ein Maximum von 140 - 206 mg m⁻² in vollentwickelten Phyllokladien (Faville et al., 1999b; Guo et al., 2002c) und nimmt in seneszenten Phyllokladien wieder ab (Guo et al., 2002c). Im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen wie Weizen, dessen Chlorophyllgehalt in Untersuchungen von Ulman et al. (2000) bei 343 - 382 mg m⁻² lag, ist der Chlorophyllgehalt von Spargel relativ niedrig.

Die Transpirationsrate (E), gemessen an Phyllokladien vollentfalteter Seitentriebe, erreicht im Hochsommer unter ambienten Bedingungen im Gewächshaus bei guter Wasserversorgung in der Zeit von 10 - 14 Uhr ein Maximum von ca. 1.1 mmol m⁻² s⁻¹ (Tab. 2.1). Da die Nettphotosyntheserate (A) im Vergleich zu E nach Erreichen des Maximums wieder absinkt, besteht nach Untersuchungen von Drost & Wilcox-Lee (1990) zwischen E und A keine Beziehung. Die Transpirationsrate 22 Tage alter Weizenpflanzen lag in Untersuchungen von Boogaard et al. (1996) in Klimakammern bei einer Belichtung von 500 μmol m⁻² s⁻¹, 20 °C und einem VPD von 1.2 kPa im Bereich von 4.0 - 4.5 mmol m⁻² s⁻¹.

Die Evapotranspiration (ET) eines Spargelbestandes erreicht in Abhängigkeit vom Alter der Anlage und dem Entwicklungsstadium Werte zwischen 0.5 - 4.5 mm d⁻¹, wobei das Maximum mit 3.6 und 4.5 mm d⁻¹ im vierten und fünften Standjahr liegt (Pardo et al., 1996). Für den entwicklungsspezifischen Wasserbedarf gelten folgende Pflanzenkoeffizienten: 0.2 - 0.3 der Referenz-ET eines Raygras-Pflanzenbestandes während der Ernteperiode, 0.4 während der Triebentwicklung und 0.9 - 1.1 bei vollständiger Triebentwicklung (Pardo et al., 1996), bzw. nach Angaben von Paschold (1999) auf Sandboden ab Stechende 0.6 und ab vollständiger Entwicklung der Phyllokladien 0.9.

Einfluss von Transferwiderständen im Blatt auf die Photosynthese

Die Bedeutung des Einflusses organismuseigener Faktoren auf das Photosynthesevermögen von Spargel wird deutlich, wenn wie bei Benson & Takatori (1980) verschiedene Genotypen trotz gleicher Blattfläche und Umweltbedingungen unterschiedliche Trockenmassen produzieren.

Dem CO₂-Einstrom in ein Blatt stehen eine Reihe von Diffusionsbarrieren im Wege, von denen der Stomatawiderstand (r_s) und der sogenannte „chemische oder Carboxylierungswiderstand“ (r_{cx}) beim enzymatischen Assimilationsprozess im Stroma der Chloroplasten die entscheidenden Größen darstellen.

Stomatawiderstand (r_s)

Die relative stomatäre Limitierung (L_{stom}) der CO₂-Assimilation, bezogen auf die potenzielle Netto-CO₂-Aufnahmerate bei $c_a = 340 \mu\text{mol mol}^{-1}$ und angenommener fehlender Limitierung durch die Stomata, erreicht bei Spargel in vollentwickelten Phyllokladien unter Lichtsättigung ein Maximum von 43 - 56 % (Tab. 2.1). In jungen und seneszenten Phyllokladien treten niedrigere Werte auf, die bei Woolley et al. (1996) mit zunehmender Temperatur anstiegen.

Mit 127 unregelmäßig verteilten Stomata pro mm^2 , deren Dichte genotypisch kaum variiert (Faville et al., 1999b), liegt die Konzentration der Stomata in den Phyllokladien deutlich über der in den Trieben mit bis zu 54 Stomata pro mm^2 (Downton & Törökfalvy, 1975). Die stomatäre Leitfähigkeit (g_s) als Reziprokwert zu r_s erreicht bei Spargel in Abhängigkeit von Genotyp und ambienten äußeren Bedingungen Höchstwerte zwischen 29 - 152 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tab. 2.1). Im Vergleich dazu erreichten junge Weizenpflanzen in Untersuchungen von Ulman et al. (2000) bei 20 °C, einem Lichtangebot von 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und einer CO₂-Konzentration von 350 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ eine g_s im Bereich von 270 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Zwischen A_{sat} und g_s von Spargel besteht eine positive Korrelation (Drost & Wilcox-Lee, 1990; Faville et al., 1999b; Guo et al., 2002c), wobei g_s nach Untersuchungen von Guo et al. (2002c) das Resultat und nicht den Grund reduzierter Photosyntheseraten darstellt und die Limitierung von A_{sat} somit in der biochemischen Kapazität des CO₂-fixierenden Systems und nicht in der CO₂-Nachlieferung durch die Stomata begründet liegt. Bai & Kelly (1999) bestätigten diese Ergebnisse nicht. Genotypische Unterschiede von A_{sat} bei Spargel können nach Berechnungen von Faville et al. (1999b) neben Unterschieden im Stickstoff-

und Chlorophyllgehalt zu 40 - 70 % auf genotypisch unterschiedliche Leitfähigkeiten der Stomata basieren.

Carboxylierungswiderstand (r_{cx})

Neben Guo et al. (2002c) wiesen weitere Autoren auf die Bedeutung des Carboxylierungswiderstandes für die photosynthetische Leistungsfähigkeit von Spargel hin. So können nach Untersuchungen von Faville et al. (1999b) bis zu 60 % der genotypischen Unterschiede von A_{sat} bei Spargel auf Unterschiede in der Kapazität und Regeneration der Ribulose-1,5-Bisphosphat-Carboxylase /Oxygenase (Rubisco) zurückgeführt werden. Am deutlichsten tritt die Bedeutung von r_{cx} in Untersuchungen von Hills (1986) hervor, der auch bei isolierten Mesophyllzellen relativ niedrige Werte für A_{sat} fand.

Tab. 2.1: Merkmale des Kohlenstoffhaushaltes von Spargel (Originalwerte teilweise mit Daten aus anderer Literatur umgerechnet, um Vergleichbarkeit herzustellen)

Größe	Einheit	Autor	Bemerkungen	
Photosynthese	Relative Wachstumsrate	0.13 - 0.14* $g\ g^{-1}\ d^{-1}$	(Woolley et al., 1996)	Gesamtpfl., Tag/Nacht-Temperatur 20/20 °C, Sämlinge bis 73 Tage alt
		0.12 - 0.13* $g\ g^{-1}\ d^{-1}$		Gesamtpfl., Tag/Nacht-Temperatur 35/15 °C, Sämlinge bis 73 Tage alt
	Netto-Photosynthesekapazität (A_{sat})	1.4 - 2.8*** $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Hills, 1986)	Isolierte Mesophyllzellen von Jungpfl., 50 $\mu g\ Chl\ ml^{-1}$
		4.3 - 6.1*** $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$		Phyllokladien von Jungpfl., weißes Licht
		8.3 - 10.8* $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Guo et al., 2002c)	Vollentfaltete und reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, 80 Pa
		5.7 - 6.6* $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$		Seneszente Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, 80 Pa CO_2
		3.8 - 6.2 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Faville et al., 1999b)	Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl., 350 $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$, 1500 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
		2.4 - 4.8 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$		9 Monate alte Gewächshauspfl., 350 $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$, 1100 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
		4.7** $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Yue et al., 1992)	In vitro-Kultur und Jungpfl., 297 $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$, 450 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
		8.5** $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Woolley et al., 1996)	Reife Phyllokladien, Tag/Nacht-Temperatur 20/20 °C, 750 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, 300 $\mu mol\ mol^{-1}$
	6 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Wilcox-Lee & Drost, 1990)	mittags unter ambienten Bedingungen, optimale Wasserversorgung, Gewächshauspfl.	
	405 - 581 $mg\ CH_2O\ m^{-2}\ h^{-1}$	(Guo et al., 2002a)	Tagesmaximum morgens, reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 35 Pa CO_2 an klaren Tagen	
	356 - 502 $mg\ CH_2O\ m^{-2}\ h^{-1}$		Tagesmittelwert, reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 35 Pa CO_2 an klaren Tagen	
	Dunkelrespirationsrate (Rd)	0.84 - 0.98 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$	(Faville et al., 1999b)	Reife Phyllokladien 10 Monate alter Gewächshauspfl., 350 $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$, 21-23 °C
0.85 - 0.94* $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$		(Guo et al., 2002c)	Vollentwickelte Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 35 Pa CO_2 , 25 °C	
0.49 - 0.22* $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$			Reife bzw. seneszente Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 35 Pa CO_2 , 25 °C	
1.5 - 2.2** $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$		(Yue et al., 1992)	In vitro-Kultur, 297 $\mu mol\ CO_2\ mol^{-1}$, 26 °C	

Fortsetzung Tab. 2.1

Äußere Faktoren	CO ₂ -Kompensationspunkt (Γ)	131 - 173 μmol mol ⁻¹ < 148 ^{###} μmol mol ⁻¹	(Faville et al., 1999b) (Yue et al., 1992)	9 Monate alte Gewächshauspfl., 1100 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 20-22 °C, VPD = 0.9 - 1.0 kPa In vitro-Kultur, 150 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 26 °C, 70 % RH	
	CO ₂ -Sättigung	70 μmol 400 - 1000 μmol mol ⁻¹ 593 ^{###} μmol mol ⁻¹	(Hills, 1986) (Inagaki et al., 1989) (Yue et al., 1992)	Isolierte Mesophyllzellen von Jungpfl., 50 μg Chl ml ⁻¹ Nur bei zunehmenden CO ₂ -Konzentrationen In vitro-Kultur, 150 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 26 °C, 70 % RH	
	Opt. Temperatur	20 ± 5 °C	(Inagaki et al., 1989)		
	Lichtkompensationspunkt (PPFD _{comp})	18 ^{##} μmol m ⁻² s ⁻¹ 30 - 39 μmol m ⁻² s ⁻¹ 26-36 [#] μmol m ⁻² s ⁻¹ < 50 μmol m ⁻² s ⁻¹ 450 μmol m ⁻² s ⁻¹	(Hills, 1986) (Faville et al., 1999b) (Inagaki et al., 1989) (Yue et al., 1992)	Isolierte Mesophyllzellen von Jungpfl., 50 μg Chl ml ⁻¹ Reife Phyllokladien 10 Monate alter Gewächshauspfl., 350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ In vitro-Kultur und Jungpflanzen, 297 μmol CO ₂ mol ⁻¹ Aklimatisierte Pfl., 297 μmol CO ₂ mol ⁻¹	
	Lichtsättigung	253 ^{##} μmol m ⁻² s ⁻¹ 714 - 893 [#] μmol m ⁻² s ⁻¹ 178 - 357 [#] μmol m ⁻² s ⁻¹ 450 μmol m ⁻² s ⁻¹	(Hills, 1986) (Inagaki et al., 1989) (Yue et al., 1992)	Isolierte Mesophyllzellen von Jungpfl., 50 μg Chl ml ⁻¹ Frühes und mittleres Entwicklungsstadium Spätes Entwicklungsstadium In vitro-Kultur und Jungpfl., 297 μmol CO ₂ mol ⁻¹	
	Stickstoffgehalt	61 - 81 mmol m ⁻²	(Faville et al., 1999b)	Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl.	
	Chlorophyllgehalt	140 - 206 mg m ⁻² 157 - 180 mg m ⁻²	(Faville et al., 1999b) (Guo et al., 2002c)	Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl. Maximum in reifen Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl.	
	Innere Faktoren	Max. Carboxylierungsrate (V _{cmax})	25 - 31* μmol m ⁻² s ⁻¹ 21 - 25* μmol m ⁻² s ⁻¹ 17 ^{***} μmol m ⁻² s ⁻¹ 30 ^{***} μmol m ⁻² s ⁻¹	(Guo et al., 2002c) (Downton & Törökfalvy, 1975)	vollentfaltete und reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 80 Pa CO ₂ senescente Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 80 Pa CO ₂ Spargeltrieb ohne Phyllokladien Phyllokladien
		Elektronentransportrate (J _{max})	62 - 73* μmol m ⁻² s ⁻¹ 51 - 55* μmol m ⁻² s ⁻¹	(Guo et al., 2002c)	Vollentwickelte und reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 80 Pa CO ₂ senescente Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 80 Pa CO ₂
		CO ₂ -Konz. interzellulär (C _i)	250 - 260 μmol mol ⁻¹	(Faville et al., 1999b)	Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl., 350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ , 1500 μmol m ⁻² s ⁻¹
Stomatäre Leitfähigkeit (g _s)		90 - 152 mmol m ⁻² s ⁻¹ 29 - 56 mmol m ⁻² s ⁻¹ 83 - 104 mmol m ⁻² s ⁻¹ 40 mmol m ⁻² s ⁻¹ 62 mmol m ⁻² s ⁻¹	(Faville et al., 1999b) (Guo et al., 2002c) (Drost & Wilcox-Lee, 1990) (Wilcox-Lee & Drost, 1990)	Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl., 350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ , 1500 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 21-23 °C, VPD = 1.0-1.2 kPa 9 Monate alte Gewächshauspfl., 350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ , 1100 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 20-22 °C, VPD = 0.9-1.0 kPa Ambiente Lichtbedingungen an klaren Tagen, 35 Pa CO ₂ , 40 % RH, 25 °C, Maximum vollentfalteter Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl. Phyllokladien vollentfalteter Seitentriebe von Jungpfl., Maximum um 10 Uhr, Ψ _{Boden} - 0.05 MPa, ambiente Licht-, Temperatur- und Luftfeuchte im Gewächshaus Mittags unter ambienten Bedingungen, optimale Wasserversorgung, Gewächshauspfl.	
Relative stomatäre Limitierung (L _{stom})		56 % 43 - 54 % 12 - 16 % 25 - 31 %	(Guo et al., 2002c) (Faville et al., 1999b) (Woolley et al., 1996)	vollentwickelte Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., 2000 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 35 Pa CO ₂ , 40 % RH, 25 °C 9 Monate alte Gewächshauspflanzen, 350 μmol CO ₂ mol ⁻¹ , 1100 μmol m ⁻² s ⁻¹ , 20-22 °C, VPD = 0.9-1.0 kPa Tag/Nacht-Temperatur 20/20, Jungpfl. bis 73 Tage alt Tag/Nacht-Temperatur 35/15, Jungpfl. bis 73 Tage alt	
Transpirationsrate (E)		0.52 ^{**} mmol m ⁻² s ⁻¹ 0.79 ^{**} mmol m ⁻² s ⁻¹ 1.1 mmol m ⁻² s ⁻¹	(Yue et al., 1992) (Drost & Wilcox-Lee, 1990)	In vitro-Kultur, 0 μmol m ⁻² s ⁻¹ In vitro-Kultur, 450 μmol m ⁻² s ⁻¹ Jungpfl., gute Wasserversorgung, Maximum 10-14 Uhr	
Xylem-Wasserpotenzial (Ψ _{Xylem})		-2.2 MPa -1.5 bis -1.8 MPa	(Guo et al., 2002c) (Drost & Wilcox-Lee, 1990)	Minimum, mittags, vollentfaltete Phyllokladien Minimum zwischen 10 bis 14 Uhr auch bei optimaler Wasserversorgung, Gewächshauspfl.	

Fortsetzung Tab. 2.1

Assimilathaushalt	Gehalt an löslichen Zuckern in Phyllokladien	0.36 - 0.41 mg cm ⁻²	(Guo et al., 2002c)	Maximum in reifen Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl., mittags
		0.14 - 0.17 mg cm ⁻²	(Faville et al., 1999b)	10 Monate alte Gewächshauspfl.
	Saccharose-Konz. in Phyllokl.	0.31 - 0.38 mg cm ⁻²	(Guo et al., 2002a)	Maximum am späten Nachmittag, Seitentriebe 6 Jahre alter Pfl.
	Assimilatexportrate	309 - 438 mg CH ₂ O m ⁻² h ⁻¹	(Guo et al., 2002a)	Tagesmaximum morgens, reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl. an klaren Tagen
	245 - 348 mg CH ₂ O m ⁻² h ⁻¹	Tagesmittelwert, reife Phyllokladien 6 Jahre alter Pfl. an klaren Tagen		

* Einheit geändert, da in Originalliteratur offenbar fehlerhaft ($\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$ zu $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; $\text{g}^{-1} \text{g}^{-1} \text{Tag}^{-1}$ zu $\text{g g}^{-1} \text{Tag}^{-1}$)

** Originalwerte umgerechnet mit SLW = 2.47 mg cm⁻² nach (Guo et al., 2002c)

*** Originalwerte umgerechnet mit mittlerem Chlorophyllgehalt von 170 mg m⁻² nach (Guo et al., 2002c) und (Faville et al., 1999b) sowie Umwandlung O₂ = CO₂ unter Annahme eines Assimilationsquotienten von 1.0

Originalwerte in [klx] umgerechnet in [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] mit Faktor 18 für Tageslicht (Krug et al., 2002), da Lichtquelle unbekannt

Originalwerte in [W m⁻²] umgerechnet in [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] mit Faktor 4.6 für Tageslicht (Krug et al., 2002)

Originalwerte in [$\mu\text{l l}^{-1}$] umgerechnet in [$\mu\text{mol mol}^{-1}$] mit Faktor 0.9888 bei einer Dichte (20 °C) von 1.84 g l⁻¹ für CO₂ und 1.21 g l⁻¹ für Luft und einem Molekulargewicht von 44 g mol⁻¹ bzw. 28.96 g mol⁻¹ für CO₂ und Luft

Die photosynthetische Leistungsfähigkeit eines Blattes hinsichtlich der Ausnutzung des CO₂-Reservoirs der Luft bzw. die Aktivität des CO₂-fixierenden Enzyms Rubisco kann neben dem **CO₂-Kompensationspunkt** (Γ) anhand der **Carboxylierungseffizienz** (CE) und der **maximalen Carboxylierungsrate** (V_{cmax}) beschrieben werden. Im Gegensatz zur Carboxylierungseffizienz, die sich aus der Steigung des proportionalen Abschnittes einer A/c_i-Sättigungskurve ergibt, wird die maximale Carboxylierungsrate (V_{cmax}) bei sättigender interzellulärer CO₂-Konzentration (c_i) angegeben. V_{cmax} von Spargel erreicht in Abhängigkeit vom Alter der Phyllokladien und dem Genotyp zwischen 21 - 31 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tab. 2.1).

Die **maximale Elektronentransportrate** (J_{max}) ist das Maß für die Kapazität der Regeneration des CO₂-Akzeptors, Ribulose-1,5-Bisphosphat, während der Photosynthese und liegt bei vollentwickelten und reifen Phyllokladien bei 62 - 73 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tab. 2.1). J_{max} nimmt mit zunehmender Seneszenz der Phyllokladien ab.

V_{cmax} und J_{max} von Spargel liegen deutlich unterhalb der Mittelwerte von 64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für V_{cmax} und 134 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für J_{max} von 109 C₃-Arten, wobei für Weizen V_{cmax} zwischen 35 - 83 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und J_{max} zwischen 87 - 193 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ liegt (Übersicht in Wullschleger, 1993). In der Gruppe der Monocotyledonen und Gemüsearten schneidet die Rubisco-Aktivität von Spargel unterdurchschnittlich ab und ist vergleichbar mit der von Koniferen und typisch für perennierende Pflanzen (Wullschleger, 1993).

Spargel ist aufgrund seiner Morphologie und Entwicklung bezüglich der Photosynthesekapazität nur schwer mit anderen Kulturpflanzen vergleichbar. Neben Guo et al. (2002c) und Faville et al. (1999b) konnte insbesondere Hills (1986) mit Untersuchungen an isolierten Mesophyllzellen belegen, dass Differenzen zu anderen Arten weniger auf morphologische oder anatomische Unterschiede beruhen, sondern im Photosyntheseapparat selbst begründet liegen. Relativ niedrige Photosynthese-, Carboxylierungs- und Elektronentransportraten sind zudem charakteristisch für perennierende oder monokotyle Pflanzen im Vergleich zu einjährigen bzw. dikotylen (Bazzaz, 1979; Wullschleger, 1993). Unterschiedliche Ertragspotenziale verschiedener Genotypen können sowohl auf biochemische als auch auf strukturelle Unterschiede der Phyllokladien zurückgeführt werden (Guo et al., 2002c).

2.2.2 Der Assimilathaushalt

Zwischen A_{sat} und dem **Assimilatexport** besteht eine starke lineare Beziehung während der Photoperiode (Guo et al., 2002b), wobei der im Tagesverlauf gemessene maximale Assimilatexport mit 309 - 438 mg $\text{CH}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Tab. 2.1) deutlich unterhalb von A_{sat} liegt. Gegen Ende der Lichtperiode übersteigt der Assimilatexport die Assimilation. Während der Dunkelperiode bleibt der Assimilatexport konstant bei durchschnittlich 250 - 358 mg $\text{CH}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Guo et al., 2002b). Die Assimilatexportkapazität während der Photoperiode, ausgedrückt als prozentualer Anteil der Assimilatexportrate an der Assimilationsrate, liegt im Mittel bei 74 % (Guo et al., 2002b).

Der Gehalt an Nicht-Struktur-Kohlenhydraten (Total Non-Structural Carbohydrate, TNC) in vollentwickelten Phyllokladien steigt bis zum Ende der Lichtperiode auf ein Maximum von 0.52 - 0.65 mg cm^{-2} an und fällt anschließend mit dem Einsetzen der Dunkelperiode wieder ab (Guo et al., 2002b). Etwa 50 - 60 % des TNC-Gehaltes vollentwickelter und reifer Phyllokladien liegen als Saccharose vor, womit Saccharose die bevorzugte Quelle für den Kohlenstoffexport darstellt. Der Stärkegehalt vollentwickelter und reifer Phyllokladien steigt während der Lichtperiode an, ist aber mit 0.12 - 0.13 mg cm^{-2} (= 20 % TNC) relativ gering (Guo et al., 2002a,b).

Zu den Schlüsselenzymen der Saccharosesynthese zählt bei Spargel u. a. die Saccharosephosphat synthetase (SPS) (Guo et al., 2002b). Die substratgesättigte Aktivität der SPS (V_{\max}) beträgt unabhängig von Licht- oder Dunkelperiode in reifen Phyllokladien zwischen $0.42 - 0.56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Guo et al., 2002b). Im Vergleich dazu stieg V_{\max} von Weizen in Untersuchungen von Sudo et al. (2003) mit zunehmendem N-Gehalt von ca. 1.5 auf $7.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ an. Mit dem Einsetzen der Seneszenz wird auch V_{\max} reduziert, wobei die Kohlenhydratkonzentration in den Phyllokladien als Folge eines reduzierten Assimilatanspruchs relativ konstant bleibt (Guo et al., 2002a). Zwischen der licht- und CO_2 -gesättigten Photosynthesekapazität (A_{\max}) und der SPS-Aktivität besteht eine enge Korrelation (Guo et al., 2002a). Aus der engen Korrelation zwischen A_{\max} , V_{\max} und der Saccharosekonzentration geht die starke lineare Beziehung zwischen der Photosynthese und dem Assimilatexport während der Photoperiode hervor (Guo et al., 2002a,b), wobei der Saccharosegehalt und die Assimilatexportrate unabhängig voneinander sind (Guo et al., 2002b). Der trotz abnehmender Photosyntheseraten kontinuierliche Anstieg der Saccharosekonzentration während der Photoperiode, deutet auf eine Funktion der Saccharose bei Wasserstress hin und ist nicht auf einen niedrigen Assimilatanspruch zurückzuführen (Guo et al., 2002b).

Die **Assimilatverteilung** folgt dem Konzentrationsgradienten zwischen den Orten großen Bedarfs (Attraktionszentren) und jenen der Assimilatsynthese oder Assimilatmobilisierung, wobei die Attraktionszentren von Spargel sich in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium und Tageslänge ändern (Woolley et al., 1999). Während im Hochsommer der größte Anteil (39.6 %) des assimilierten Kohlenstoffs jungen Trieben zugeführt wird, gelangen im Spätsommer noch 6.3 % des Kohlenstoffs in junge Triebe und 68.9 % in die Speicherwurzeln (Woolley et al., 1999).

Der TNC-Gehalt in den Speicherwurzeln erreichte in Untersuchungen von Guo et al. (2002a) und Woolley et al. (1999) ein Maximum von etwa 52 - 57 % in TM im Spätsommer und während der Ruheperiode und sank als Folge von Ernte und Triebwachstum auf ein Minimum von ca. 20 % in TM während der Kraut-etablierungsphase. Martin & Hartmann (1990) stellten sowohl bezüglich des Maximums als auch des Minimums höhere Werte fest. Kohlenhydrate werden in

den Speicherwurzeln überwiegend als Fruktane gespeichert (Martin & Hartmann, 1990; Woolley et al., 1999). Die Saccharosekonzentration in den Speicherwurzeln schwankt zwischen ca. 5 - 9 % in TM (Guo et al., 2002a). Die Akkumulation von Kohlenhydraten erfolgt überwiegend in neugebildeten jungen Speicherwurzeln und eben diese Kohlenhydrate werden überwiegend für das Stangenwachstum mobilisiert (Karno & Woolley, 2002).

Die Änderung des Attraktionszentrums während der Stangenwachstums- bzw. der Krautetablierungsphase spiegelt sich in Änderungen der Enzymaktivitäten wider (Guo et al., 2002a). Da sich die Menge an Kohlenhydraten am Ende der Krautetablierungsphase bei gleichen Umweltbedingungen trotz unterschiedlich starker Krautentwicklung meist auf dem gleichen Niveau befindet, ist neben der Menge an Kohlenhydraten auch deren Verfügbarkeit bzw. Mobilisierbarkeit von großer Bedeutung (Guo et al., 2002a). Demzufolge kann eine stärkere Krautentwicklung auch auf höhere Aktivitäten Saccharose-transportierender und -synthetisierender Enzyme zurückgeführt werden (Guo et al., 2002a). Neben der Assimilatproduktion in den Phyllokladien kann daher auch die Effizienz der Assimilatverteilungsstrategie in den Speicherwurzeln den Ertrag beeinflussen (Guo et al., 2002a).

2.3 Der Wasser- und Stickstoffhaushalt von Spargel

2.3.1 Adaptionen von Spargel an Trockenstress

Die Wasseraufnahme erfolgt bei Spargel im wesentlichen über dünne einjährige Faserwurzeln, die aus dem Zentralzylinder der Speicherwurzeln wachsen. Die Wurzeln sind überwiegend in der Ackerkrume konzentriert, sie können jedoch mit zunehmendem Alter tiefere Bodenschichten (1.5 m) für die Wasser- und Nährstoffversorgung erschließen (Drost, 1999a).

Aufgrund dieses umfangreichen Wurzelsystems und seiner verwandtschaftlichen Beziehungen zu trockenresistenten Pflanzen ging Spargel lange Zeit der Ruf voraus trockenresistent zu sein. In Untersuchungen zur Anpassung von Spargel an Trockenstress konnten insgesamt aber deutliche Reaktionen festgestellt werden. Wasserdefizite reduzierten Ψ_{Xylem} , g_s , E , A (Drost & Wilcox-Lee, 1990; Wilcox-Lee & Drost, 1990), das ober- und unterirdische Pflanzenwachstum (Bloom, 2003; Cannell & Takatori, 1970; Drost, 1996, 1999a; Wilcox, 1985; Wilcox-Lee & Drost, 1990; Drost & Wilcox-Lee, 1990), die Kohlenhydratakkumulation (Drost & Wilcox-Lee, 1997a) sowie die Knospenanzahl, -größe und -langlebigkeit (Drost & Wilcox-Lee, 1990, 1997a,b). Daraus können Ertragsdepressionen (Drost, 1999b; Hartmann, 1981; Roth & Gardner, 1989, 1990) und eine reduzierte Langzeitproduktivität resultieren. Da Spargel aber in der Lage ist, Wachstumsdefizite, die über einen längeren Zeitraum entstanden sind, ausreichend zu kompensieren, führen Wasserdefizite nicht zwangsläufig zu Langzeiteffekten (Drost & Wilcox-Lee, 1997a,b; Wilson et al., 1996).

In neueren Untersuchungen wird Spargel daher insgesamt als moderat trocken-tolerant eingestuft (Daningsih et al., 2004; Drost, 1999b; Wilcox, 1985; Wilcox-Lee & Drost, 1990; Wilson et al., 1996). Wilcox (1985) und Wilcox-Lee & Drost (1990) schränken die Trockentoleranz auf niedrige Wasserversorgungsstufen ein, da Spargel in ihren Untersuchungen im Bereich nahe der Feldkapazität (-0.05 bis -0.30 MPa) auf kleine Reduktionen des Bodenwasserpotenzials mit relativ großen Wachstumsdepressionen reagierte. Sie empfehlen daher trotz einer charakteristischen Trockentoleranz eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität zur Maximierung der Erträge sicherzustellen.

2.3.2 Wasser- und Humusversorgung im Spargelanbau

Spargel wird wegen seiner spezifischen Anforderungen an die maschinelle Bearbeitung überwiegend auf Sandböden angebaut, deren Feldkapazität vom Humusgehalt bestimmt wird. In Sandböden erhöht eine Anhebung des Humusgehaltes von 0.5 auf 1.5 % die nutzbare Feldkapazität um 0.5 Vol.-% (Finnern et al., 1994). Paschold et al. (1999a) konnten durch Grüneinsaat eine Erhöhung des Humusgehaltes von 0.3 auf 1.4 % erreichen, was zu hochsignifikanten Ertragssteigerungen bei Spargel führte, die auf eine Verbesserung des Bodenwasserhaushaltes zurückzuführen waren.

In Reihenuntersuchungen von Hartmann & Hermann (1986) wiesen 38.8 % der Spargelflächen Humusgehalte bis zu 1.7 % auf, ebenso viele lagen mit ihren Humusgehalten zwischen 1.7 - 2.6 %. Die Funktionen des Humus für Pflanze und Boden sind vielseitig (Bachmann & Zhang, 1991; Becher, 1996; Giusquiani et al., 1995; Körschens, 1999; Steffens et al., 1996):

- Speicherung und Transformation von Nährstoffen
- Förderung der bodenbiologischen Aktivität (phytosanitäre Wirkungen)
- Verbesserung der physikalischen Bodeneigenschaften (Aggregatstabilität, Bodenluft, Wasserspeicherung, Durchwurzelbarkeit)
- Erosionsschutz

Aufgrund des durch die intensive Bodenbelüftung beim Auf- und Abdämmen geförderten Humusabbaus und des langen Zeitraums ohne Bewuchs haben Spargelflächen einen jährlichen **Humusersatzbedarf** von 30 bis 50 dt/ha organischer Trockenmasse (Ziegler, 2002).

Mit dem Ziel, insbesondere die bodenphysikalischen Eigenschaften wie die Erhöhung der Dammstabilität und die Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität sowie die Begünstigung der Erwärmung der Böden im Frühjahr zu erreichen, werden praxisüblich im Spargelanbau zur Deckung des Humusbedarfs bis zu 1000 dt/ha Frischmasse an organischen Düngern insbesondere zur Neupflanzung ausgebracht. Mehwald (1991b) empfiehlt jährlich ca. 100 dt/ha gut verrotteten Stallmist direkt im Anschluss an die Ernteperiode auszubringen. Da das Abdämmen der Spargelanlagen heutzutage aber überwiegend erst im Herbst vorgenommen wird, ist diese Form der turnusmäßigen Ausbringung nicht mehr möglich. Im Spargelanbau werden zur organischen Düngung überwiegend betriebseigene Wirtschaftsdünger wie Stallmist oder Gülle, sowie in Abhängigkeit

vom regionalen Angebot auch Hühnertrockenkot, Putenmist und Sekundärrohstoffdünger wie abgetragenes Substrat aus der Speisepilzproduktion (Champost) oder Komposte aus kommunalen Kompostierungsanlagen eingesetzt (Anonym, 2001a; Komnik, 1994; Krug, 1998). Da Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdünger als natürliche Abfallprodukte aus verschiedenen Lebens- und Produktionsbereichen stammen, weisen sie sehr unterschiedliche Eigenschaften und Zusammensetzungen auf.

Bei der landwirtschaftlichen Verwertung sind insbesondere Nährstoffgehalte und -frachten sowie die Humusreproduktionsleistung der organischen Dünger von Bedeutung.

Die **Humusreproduktionsleistung** ist abhängig vom Dauerhumusanteil, der im Gegensatz zum Nährhumusanteil nach der Einarbeitung in den Boden nur langsam ab- und umgebaut wird und in seinen strukturellen und chemischen Eigenschaften dem ursprünglichen Bodenhumus ähnelt. Komposten wird nach Niedermoortorf die höchste Humusreproduktionsleistung zugeschrieben (Gutser & Ebertseder, 2002).

Die **Nährstofffrachten** organischer Dünger decken einen Teil des Bedarfs einer Spargelanlage und müssen nach den Grundsätzen der ‚guten fachlichen Praxis‘ grundsätzlich in die Düngeplanung einbezogen werden (Anonym, 1996). Art und Zusammensetzung des Ausgangsmaterials der organischen Dünger sowie die Abbaubedingungen im Boden nach der Ausbringung und Einarbeitung sind entscheidend für den Zeitraum der N-Freisetzung der organischen Dünger (Kögel-Knabner et al., 2000).

Die Abschätzung der Mineralisierung der organischen N-Dünger bereitet erhebliche Schwierigkeiten, da aufgrund der nicht steuerbaren biochemischen Umsetzungen schwer vorherzusagen ist, wann der Stickstoff pflanzenverfügbar wird. Im Mittelpunkt des Konflikts zwischen pflanzenbaulichen Anforderungen und ökologischen Belangen steht der Nährstoffeintrag (insbesondere Nitrat) ins Grundwasser, der weder aus ökonomischer noch aus ökologischer Sicht wünschenswert ist. Dieses Risiko kann durch die folgenden zwei Ansätze reduziert werden:

Vermeidung von Sickerwasserbildung

Das Risiko der Nitratauswaschung steigt mit zunehmender Sickerwasserbildung, welche maßgeblich von der Feldkapazität des Bodens abhängt, die bei den typisch leichten Spargelböden gering ist. Die Erhöhung der Feldkapazität durch organische Düngung bedarf hoher Aufwandmengen und ist nur in sehr engen Grenzen möglich, so dass gegebenenfalls die Bewässerungsbedürftigkeit reduziert, aber nicht vollständig auf Bewässerung verzichtet werden kann. In der Praxis wird überwiegend nach augenscheinlichem Bedarf mit Beregnungsmaschinen bewässert. Diese Art der Bewässerung ist zwar kostengünstig und flexibel einsetzbar, sie weist jedoch eine unbefriedigende Wasserverteilung, eine geringe Wassereffizienz sowie eine hohe Windanfälligkeit auf und bietet auf leichten Böden ein großes Potenzial für Nährstoffverluste in Verbindung mit Sickerwasserbildung. Als Lösungsansatz zur Vermeidung von Sickerwasserverlusten bietet sich daher die Verwendung eines organischen Düngers mit hoher Humusreproduktionsleistung zur Reduzierung der Bewässerungsbedürftigkeit in Kombination mit einer dem Bedarf angepassten Bewässerung an.

Vermeidung hoher Stickstofffrachten bei organischer Düngung

Die Stickstofffracht der organischen Dünger erhöht in Abhängigkeit vom Mineralisationsverhalten das Risiko von Nitratverlusten bei Sickerwasserbildung. Insbesondere durch Mineralisationsprozesse die außerhalb des Zeitraumes der N-Aufnahme von Spargel stattfinden (Herbst, Winter), können hohe Nitratgehalte im Boden entstehen, die der Auswaschungsfahr unterliegen (Duynisveld & Strebel, 1990). Ebenso kann es aber auch durch organische Düngung und dem damit verbundenem Einbau frisch mineralisierter Stickstoffverbindungen in Bakterienmasse oder neu gebildeter Humussubstanzen zur zeitweiligen Unterversorgung von Pflanzen kommen. Als Lösungsansatz liegt daher die Verwendung organischer Dünger mit relativ niedriger Nährstofffracht und niedrigen N-Mineralisationsraten nahe.

Sowohl eine bedarfsgerechte Bewässerung als auch die Verwendung eines organischen Düngers, dessen N-Angebot pflanzenbaulich gut nutzbar ist, können zur Reduzierung der Nitratverluste und Erhöhung der Wasser- und Stickstoffnutzungseffizienz (WUE bzw. NUE) im Spargelanbau beitragen.

2.4 Lösungsansätze zur Erhöhung der Wasser (WUE)- und Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) im Spargelanbau

Die Wassernutzungseffizienz (Water Use Efficiency, WUE) im Feld kann nach Angaben von Wallace & Batchelor (1997) durch verschiedene pflanzenbauliche und technische Maßnahmen sowie durch eine angepasste Bewirtschaftung verbessert werden. Zu den pflanzenbaulichen Maßnahmen zählt die Verbesserung der Niederschlagsausnutzung und die Reduktion der Evaporation durch konservierende Bodenbearbeitung, die Verwendung von dem Wasserangebot angepasster Arten und Fruchtfolgestrategien mit hohem Bodenbedeckungsgrad. Aus technischer Sicht sollten zur Verbesserung der WUE Bewässerungssysteme mit geringen Applikationsverlusten und einer gleichmäßigen Wasser-Verteilung verwendet werden. Zudem sollte die Bewässerung dem jeweiligen Bedarf der Pflanzen angepasst werden und nur Defizite ausgleichen, um die Wasseraufnahme aus tieferen Bodenschichten zu fördern.

Beispiele zur WUE von unterschiedlich bewässertem Mais zeigen große Unterschiede zwischen den Bewässerungstechniken wie u. a. Beregnung, ober- und unterflurige Tropfbewässerung und den Bewässerungshöhen (Howell, 2001). Die höchsten Werte werden meist erzielt, wenn der maximale Ertrag pro Flächeneinheit noch nicht erreicht ist (Bos, 1980).

Aufgrund der geringen Applikationsverluste (geringe Wasserverluste durch reduzierte Evaporation, Abfluss und Versickerung) wird der Tropfbewässerung die größte WUE gegenüber herkömmlichen oberflächigen Bewässerungssystemen zugeschrieben. Als größter Vorteil von Tropfbewässerungssystemen wird die Vermeidung großer Fluktuationen im Bodenwassergehalt durch kleine Wassergaben in hoher Frequenz gesehen, die auch kurzzeitigen Wasserstress der Pflanzen verhindern (Dasberg & Or, 1999; Bucks & Davis, 1986). Insbesondere die weiten Reihenabstände (1.8 - 2.0 m) und die Standdauer von bis zu neun Jahren machen auch unterflurige Tropfbewässerungssysteme gegenüber herkömmlichen Systemen für den Spargelanbau attraktiv.

Der Einfluss einer bedarfsorientierten Wasserversorgung über Tropfbewässerung auf die Reduzierung von Wasser- und Nährstoffverlusten und die damit verbundene Erhöhung der WUE und NUE (Nitrogen Use Efficiency) von Spargel kann durch den Einsatz von Komposten mit hoher Humusreproduktionsleistung und niedrigen N-Mineralisationsraten verstärkt werden.

Kompost ist ein Rotteprodukt aus pflanzlichen Abfällen und gelegentlich aus tierischen Exkrementen (Scharpf, 2002). Neben den genannten positiven Wirkungen von organischen Düngern auf die biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften bieten Komposte gegenüber anderen Maßnahmen zum Ausgleich des Humusgehaltes folgende Vorteile:

- Während des Kompostierungsvorganges werden leicht abbaubare C-Verbindungen der Bio- und Grünabfälle weitgehend mineralisiert und schwerer abbaubare Bestandteile überwiegend in stabile Huminstoffe überführt (Ebertseder et al., 1997). Die Abbaurate der mit reifem Kompost zugeführten organischen Substanz unterscheidet sich kaum von jener der Bodensubstanz (Ebertseder et al., 1997). Fertigkomposte bestehen bis zu 50 % aus stabilisierter organischer Substanz, während der Dauerhumusanteil von Frischkompost bei 25 - 30 % liegt. Der Anteil an stabilen Humuskomponenten nimmt in folgender Reihenfolge ab: Fertigkompost > Frischkompost, Rottemist > Frischmist > Gülle, Stoppeln, Stroh > Zwischenfrüchte, Rübenblatt (Kasten, 2001).
- Der in Fertigkomposten enthaltene Mineralstickstoff (5 %) kann im Jahr der Anwendung als pflanzenverfügbar angesehen werden. Die N-Nachlieferung des übrigen Kompoststickstoffs ist vergleichbar mit der N-Freisetzung der organischen Substanz des Bodens (1.5 bis 3.5 % pro Jahr) (Ebertseder et al., 1997). Die langsamen Stickstoffflüsse sind pflanzenbaulich besser nutzbar. Eine Netto-Immobilisation ist nur beim Einsatz von wenig stabilisierten Frischkomposten zu erwarten (Ebertseder et al., 1997).
- Komposte sind reich an Phosphor und Kalk und weisen daher pH-Werte im schwach alkalischen Bereich auf. Die Frachten an pflanzenverfügbaren Nährstoffen von Komposten aus kommunalen Abfällen sind im Vergleich zu anderen Wirtschaftsdüngern gering (Eurich-Menden & Döhler, 2000).
- Die Aktivierung des Bodenlebens durch langjährige Kompostanwendung kann das antiphytopathogene Potenzial im Boden stärken (Tränkner & Dehne, 2002; Bischoff, 1987).

Die Anwendung von Komposten ist durch die Bioabfallverordnung (BioAbfV, Anonym, 1998) geregelt. Aus abfallrechtlichen Gesichtspunkten und aus Gründen des Bodenschutzes sind die maximal zulässigen Ausbringungsmengen an

die Schwermetallgehalte gekoppelt. Bei guten Kompostqualitäten (Schadstoffhöchstgehalte laut § 4 Abs. 3, Satz 2 BioAbfV) dürfen maximal 30 t Trockensubstanz (TS) pro Hektar in drei Jahren ausgebracht werden, bei höher befrachteten Komposten (Schadstoffhöchstgehalte laut § 4 Abs. 3, Satz 1 BioAbfV) maximal 20 t TS/ha in drei Jahren.

Geringe Nährstofffrachten und N-Verluste in Verbindung mit einer hohen Humusreproduktionsleistung machen Komposte als organische Dünger für den Spargelanbau attraktiv. Die Einflüsse von bedarfsgerechter Kompostdüngung und Bewässerungsstrategie sowie deren Wechselwirkungen auf Wachstum, Ertrag, WUE und NUE der Spargelkultur wurden bislang noch nicht untersucht und sind daher Inhalt der hier vorgestellten Forschungsprojekte.

2.5 Zielsetzung

Spargel wird überwiegend auf leichten, sandigen Böden mit geringer Sorptionsfähigkeit für Nährstoffe und geringer Feldkapazität angebaut. Durch den Einsatz organischer Dünger kann die Wasserspeicherkapazität des Bodens erhöht und das Risiko von Auswaschungsverlusten durch zusätzliche Sorptionskapazität vermindert werden. Da der Anteil an stabilen Humuskomponenten im Fertigungskompost höher ist als im üblicherweise eingesetzten verrotteten Pferdemist wird dem Fertigungskompost eine höhere Humusreproduktionsleistung zugeschrieben.

Das Ziel dieser Arbeit war es nun zunächst, experimentell den Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf das Wachstum, den Ertrag und die Wassernutzungseffizienz (WUE) von Spargel zu ermitteln. Hierzu wurden am Institut für Gemüse- und Obstbau der Universität Hannover zwei von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Forschungsprojekte im Spargelanbau durchgeführt.

Das Projekt ‚**Komposteinsatz im Spargelanbau**‘ im Rahmen des DBU-Verbundprojektes ‚Förderung der Bioabfallverwertung‘ (DBU AZ 08738, Dauer 1997-2000) wurde im Frühjahr 2000 abgeschlossen (Bloom, 2003). Das Ziel des Projektes war die Prüfung der generellen Eignung von Komposten als organische Dünger im Spargelanbau im Vergleich zum konventionell angewendeten Pferdemist. In Feldversuchen auf Praxisflächen wurden Mineralisationsverläufe, N-Haushalt sowie Wachstum und Ertrag der Spargelkultur in Abhängigkeit von Art und Menge der organischen Düngung und Höhe der zusätzlichen mineralischen Düngung miteinander verglichen. Einer dieser Feldversuche wurde im Folgeprojekt ‚**Umweltgerechte Spargelproduktion**‘ (DBU AZ 17046, Dauer 2000-2004) weitergeführt. Der Fokus dieses Projektes lag auf der Untersuchung der positiven Wechselwirkungen von organischer Düngung und bedarfsgerechter Bewässerung. Die Ergebnisse dieses Projektes werden im Folgenden in drei Kapiteln dargestellt.

Die Ergebnisse eines mehrjährigen Feldversuchs, der im Jahr 2002 auf einer Praxisfläche in einer Spargelneupflanzung angelegt wurde, des o. g. weitergeführten Feldversuchs sowie zweier Gefäßversuche in Vegetationshallen mit einjährigen Spargeljungpflanzen zum Einfluss organischer Dünger (Fertigungskompost, Pferdemist, Champignonkultursubstrat (Champost)) auf Wachstum, Ertrag und N-Haushalt des Spargel sind in Kapitel 3 dargestellt. Die in einem Inkubations-

versuch in Klimakammern über einen Zeitraum von 203 Tagen bei 10 und 20 °C untersuchte Mineralisationskinetik der organischen Dünger ist Kapitel 5 zu entnehmen. Da sich im 2002 angelegten Feldversuch Hinweise auf Beeinträchtigungen des Kronenwachstums des Spargels durch Unterflur-Tropfbewässerung ergaben, wurde im Jahr 2004 ein weiterer Gefäßversuch durchgeführt (Kapitel 4), um den Einfluss von Unterflur-Tropfbewässerung auf den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen zu untersuchen.

3 Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf Wachstum und Ertrag von Spargel

Kurzfassung

Spargel wird überwiegend auf leichten, sandigen Böden mit geringer Sorptionsfähigkeit für Nährstoffe und geringer Feldkapazität angebaut. Durch den Einsatz organischer Dünger kann die Wasserspeicherkapazität des Bodens erhöht und das Risiko von Auswaschungsverlusten durch zusätzliches Sorptionspotenzial vermindert werden. Das Ziel dieser Untersuchungen war es daher, experimentell den Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf das Wachstum, den Ertrag und die Wassernutzungseffizienz (WUE) von Spargel zu ermitteln. Dazu wurden in Nordwest-Deutschland zum einen in den Jahren 2002 und 2003 zwei Gefäßversuche mit Sandboden mit den Faktoren ‚Wasserversorgung‘ (50, 70 und 85 % Gefäßkapazität (GK)), ‚Organische Düngung‘ (Fertigkompost, Pferdemist, Champost (Aufwandmenge jeweils 4000 kg C/ha), Kontrolle) und ‚N-Angebot‘ durchgeführt und deren Einfluss auf das Wachstum und die Nährstoffaufnahme sowie -verlagerung einjähriger Spargelpflanzen untersucht. Zum anderen wurde in zwei mehrjährigen Feldversuchen auf Praxisflächen (humoser Sand) mit Spargelbeständen unterschiedlicher Standjahre darüber hinaus auch der Einfluss der Faktoren auf den Spargelertrag erfasst. Die Untersuchungen führten in einem Feldversuch zu dem Ergebnis, dass eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität zur Maximierung des Spargelertrages erforderlich ist, was auch den meisten Literaturangaben entspricht. Eine Wasserversorgung bei 85 % nFK erhöhte gegenüber einer bei 50 % nFK den Rohertrag um 8 % und steigerte das mittlere Stangengewicht und den Anteil der HKI Extra am Ertrag. Bezüglich des Einflusses der Wasserversorgung auf das Wachstum von Spargel waren keine einheitlichen Effekte nachweisbar. Bei niedrigem Wasserangebot (50 % nFK) konnte die höchste WUE des Spargels erzielt werden. Organische Düngung erhöhte den Rohertrag im ersten Jahr nach der Ausbringung tendenziell um 5 - 8 % und im zweiten um 4 % gegenüber einer Kontrolle ohne organischer Düngung. In den Gefäßversuchen förderte der Einsatz von Fertigkompost das Wachstum und die WUE von Spargel im Vergleich zu Pferdemist und Champost, wobei die Ursachen für das bessere Abschneiden des Fertigkompostes nicht abschließend geklärt werden konnten.

3.1 Einführung

Der Ertrag des Spargels (*Asparagus officinalis* L.) wird direkt von den remobilisierbaren Kohlenhydratreserven der Wurzelkrone bestimmt (Downton & Törökfalvy, 1975; Guo et al., 2001). Die Kohlenhydratreserven sind vom Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln und insbesondere von der Gesamtwurzelmasse abhängig (Woolley et al., 1999; Guo et al., 2002a). Da die Kohlenhydratreserven das Ergebnis der Assimilatproduktion und -verlagerung des Aufwuchses aus dem Vorjahr darstellen, besteht ein indirekter Einfluss des Krautwachstums auf den Ertrag (Benson & Takatori, 1980; Downton & Törökfalvy, 1975; Guo et al., 2001).

Bevor das Absterben junger Triebe, die sogenannte Triebspitzenwelke oder ‚Spazierstockkrankheit‘ (Wuchner & Hartmann, 1975), und das Ausbleiben des üblicherweise Anfang August zu erwartenden zweiten Austriebs beobachtet und auf Trockenstress zurückgeführt wurde, ging Spargel in der Praxis wegen seines umfangreichen Wurzelsystems und seiner verwandtschaftlichen Beziehungen zu trockenresistenten Pflanzen lange Zeit der Ruf voraus trockenresistent zu sein. Die Quantifizierung der Anpassungsreaktionen von Spargel an Trockenstress führte letztlich zur Einstufung des Spargels in die Gruppe der moderat trockentoleranten Pflanzen (Daningsih et al., 2004; Drost, 1999b; Wilcox, 1985; Wilcox-Lee & Drost, 1990; Wilson et al., 1996). Wilcox (1985) sowie Wilcox-Lee & Drost (1990) stellten fest, dass Spargel im Bereich nahe der Feldkapazität auf kleine Reduktionen des Boden-Wasserpotenzials (Ψ_{Boden}) mit relativ großen Wachstumsdepressionen reagierte und empfehlen daher trotz einer charakteristischen Trockentoleranz zur Maximierung des Ertrages eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität sicherzustellen. Als Faustzahl für den Wasserbedarf des Spargels im deutschen Klimaraum gilt nach Mehwald (1991a) 200 mm von Juli bis August sowie 50 mm bis Mitte September. Da Spargel mit seinen spezifischen Anforderungen an die maschinelle Bearbeitung überwiegend auf Sandböden mit geringer Feldkapazität angebaut wird, kann in Trockenperioden zur Sicherstellung der Wasserversorgung auf Zusatzbewässerung oft nicht verzichtet werden.

Organische Düngung, die praxisüblich mit teilweise erheblichen Aufwandmengen in Form von Pferdemist zur Deckung des Humusbedarfs ausgebracht wird, bietet viele pflanzenbauliche Vorteile. Grundsätzlich ist zwischen einer direkten

Wirkung der enthaltenen Nährstoffe und einer indirekten, insbesondere von der organischen Substanz ausgehenden Wirkung auf das Pflanzenwachstum, zu unterscheiden (Gutser & Ebertseder, 2002). Organische Düngung kann den Humusgehalt eines Bodens erhöhen und so wesentliche Fruchtbarkeitsmerkmale des Bodens wie die Wasserspeicherkapazität (Kaufmann et al., 1977; Mamo et al., 2000) verbessern.

Aufgrund der Abbaustabilität der mit reifen Komposten zugeführten organischen Substanz weisen Komposte nach Niedermoortorf die höchste Humusreproduktionsleistung aller organischen Dünger auf und bewirken daher eine vergleichsweise starke Humusanreicherung im Boden (Gutser & Ebertseder, 2002). In einem mehrjährigen Versuch auf sandigem Lehmboden erzielten Ebertseder et al. (1997) durch Kompostgaben von $2 \times 510 \text{ kg N}_{\text{GES}}/\text{ha}$ ($\triangleq 346.94 \text{ dt TM}/\text{ha}$) einhergehend mit einer Erhöhung des C-Gehaltes eine Abnahme der Lagerungsdichte und eine Zunahme des Porenvolumens von 41 % auf 46 %. Dabei wurden die Grob- und Mittelporen und damit die Kapazität für pflanzenverfügbares Wasser sowie die Wasserhaltefähigkeit jedoch nicht verändert.

Aus ökologischer Sicht ist organische Düngung aufgrund der erheblichen Nährstofffrachten, insbesondere der N-Fracht, deren Mineralisation schwer zu kalkulieren ist, kritisch zu betrachten. Im Mittelpunkt des Konfliktes zwischen pflanzenbaulichen Anforderungen und ökologischen Belangen steht der Nährstoffeintrag ins Grundwasser, der weder ökonomisch noch ökologisch wünschenswert ist. Um diesen Fluss zu minimieren, sind Sickerwasserbildung und Nährstofffrachten bei organischer Düngung gering zu halten. Komposte bieten durch ihre im Vergleich zu Pferdemist hohe humusreproduzierende Wirkung ein größeres Potenzial zur Reduzierung der Bewässerungsbedürftigkeit von Spargel bei gleichzeitiger relativ niedriger Nährstofffracht und niedrigen N-Mineralisationsraten (Ebertseder et al., 1997). In diesem Zusammenhang wurden Feld- und Gefäßversuche durchgeführt, um folgende Hypothesen zu prüfen:

1. Zur Maximierung des Ertrages benötigt Spargel eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität
2. Komposte steigern die Wassernutzungseffizienz (WUE) von Spargel mehr als der üblicherweise eingesetzte Pferdemist

3.2 Material & Methoden

3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Prüfung dieser Hypothesen wurden je zwei Feld- und Gefäßversuche (Tab. 3.1 und 3.2) durchgeführt, die den Einfluss der Faktoren ‚Wasserversorgung‘ und ‚Organische Düngung‘ auf das Wachstum der Spargelpflanze sowie deren Nährstoffaufnahme und -verlagerung klären sollten.

Tab. 3.1: Faktoren und Stufen in den Feld- und Gefäßversuchen

	Feldversuch (FV) 02-04	Feldversuch (FV) 00-04	Gefäßversuch (GV) 02	Gefäßversuch (GV) 03
Faktoren	Stufen			
Bewässerungshöhe	50 und 85 % nFK		50, 70 und 85 % Gefäßkapazität (GK)	
Org. Düngung*	Fertigkompost (FK 02) Pferdemist (PM 02) Champost (CK) Kontrolle	Fertigkompost (FK 00) Frischkompost (FriKo) Pferdemist (PM 00)	Fertigkompost (FK 02) Pferdemist (PM 02) Champost (CK) Kontrolle	Fertigkompost (FK 03) Pferdemist (PM 03) Kontrolle
N-Angebot**				0.9 g N/Pfl. 1.4 g N/Pfl.
Aufwandmenge der org. Düngung	4000 kg C/ha	35 m ³ /ha (mit) 0 m ³ /ha (ohne)	4000 kg C/ha	4000 kg C/ha
Wiederholungen	3	2	3	3

* Komposte waren gütegesichert entsprechend der Richtlinien der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

** 0.9 und 1.4 g N/Pfl. entsprechen Düngung auf N_{min}-Sollwerte von 80 bzw. 130 kg N/ha bezogen auf Gefäßoberfläche

Tab. 3.2: Übersicht über Aufbau und Durchführung der Versuche

	FV 02-04	FV 00-04	GV 02	GV 03
Ort	Fuhrberg bei Hannover (Ø 670 mm, Ø 8.9 °C)		Vegetationshalle Hannover	
Zeitraum	Mrz. 02 - Mai 04	Mrz. 00 - Mai 04	Mrz. 02 - Nov. 02	Apr. 03 - Okt. 03
Design	Spaltanlage (Bewässerungshöhe = Mainplot)	Blockanlage	Blockanlage	Blockanlage
Sorte	Gijnlim			
Alter der Anlage	angelegt Mrz. 02	angelegt Mrz. 97	einjährige Spargeljungpflanzen	
Bestandesdichte	16800 Pfl./ha (Reihenabstand 180 cm)		n. b.	
Parzellengröße /Gefäßgröße	172.8 m ² (brutto) 57.6 m ² (abzügl. Rand)	151.2 m ² (brutto) 57.6 m ² (abzügl. Rand)	34 l (Ø 37 cm)	
Wasser-versorgung	Unterflur-Tropfbewässerung (Uniram 20, Netafim; 1.6 l/h, Tropfer- und Schlauchabstand 30 bzw. 180 cm, 3 l m ⁻² h ⁻¹ , Rhizomebene)	überkopf mit Beregnungsmaschine	von Hand	
Steuerung der Bewässerung	TDR-Sonden* (3 pro Parzelle am Tropfschaluch)	nach augenscheinlichem Bedarf	TDR-Sonden ab Entfaltung der Phyllokladien (Mitte Mai) bis Beginn Abreife	
N-Düngung	praxisüblich (Harnstoff, Ammonium-Nitrat-Harnstoff-Lösung (AHL), überwiegend als Reihendüngung)		1 g N/Pfl. (26.04.), Ammoniumnitrat	Stufen (23.04.), Ammoniumnitrat
Grunddüngung	betriebsüblich		nach Gehaltssklassen im April	
Pflanzenschutz	betriebsüblich		kein	
Bodenart	humoser Sand			
nFK bzw. GK[#]	21.7 Vol.-% nFK ^{##}	nicht bestimmt	22.4 Vol.-% GK ^{##}	21.4 Vol.-% GK ^{##}
Lagerungsdichte[#]	1.44 g/cm ³	1.44 g/cm ³	1.44 g/cm ³	1.45 g/cm ³
org. Substanz[#]	3.3 %	2.3	3.3	3.1
pH-Wert[#]	6.7	6	5.3	5.1

* TDR-Sonden der Firma Soilmoisture Equipment Corp. (Santa Barbara, USA)

** 1 g N/Pfl. entspricht Düngung auf N_{min}-Sollwert von 90 kg N/ha bezogen auf Gefäßoberfläche

[#] Eigenschaften zu Versuchsbeginn bzw. der Kontrolle

^{##} Bestimmung der Feldkapazität erfolgte mit ungestörten Stechzylinderproben (200 cm³) aus dem Wurzelraum, ein geschätzter Totwasseranteil von 5 Vol.-% wurde abgezogen. Gefäßkapazitäten (Wasserkapazität der Gefäße) wurden mit Stechzylinderproben aus entsprechend befüllten und wassergesättigten Gefäßen mit perforiertem Boden ermittelt.

Die Feldversuche lagen auf Praxisflächen im Fuhrberger Feld, dem Hauptwasereinzugsgebiet (WSG III) von Hannover. Der FV 00-04 wurde ursprünglich im Projekt ‚Komposteinsatz im Spargelanbau‘ (Bloom, 2003) 1997 angelegt und ab 2000 mit den in Tab. 3.1 genannten Faktoren weitergeführt. Dabei wurden die 1997 gering organisch gedüngten Parzellen im Frühjahr 2000 erneut und die 1997 stärker gedüngten nicht erneut organisch gedüngt. Auf vormals Bioabfallkompostparzellen wurde dabei ein Frischkompost, auf Grüngut- ein Fertigkompost und auf Pferdemitparzellen erneut Pferdemit ausgebracht. Die Nährstofffrachten der organischen Dünger sind dem Anhang zu entnehmen (Tab. 8.2).

Im FV 02-04 wurde über Unterflur-Tropfbewässerung bewässert, wobei die Steuerung der Bewässerung über den mit TDR-Sonden gemessenen Bodenwassergehalt erfolgte. In einem Vorversuch wurde dazu festgestellt, dass zur Erhöhung des Wassergehaltes im Wurzelbereich um 1 Vol-% eine Wassergabe in Höhe von 2.4 mm erforderlich war und eine Wassergabe zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Wasserverteilung im Bewässerungssystem mindestens 3 mm (≥ 1.25 Vol.-% Differenz) groß sein musste. War dies der Fall, wurde jeweils die Wassermenge gegeben, die zur Erlangung des Sollwertes erforderlich war. Diese wurde aus dem Produkt der Differenz des mittleren Wassergehaltes im Wurzelraum einer Wasserstufe zu deren jeweiligen Sollwert und den erforderlichen 2.4 mm pro Vol.-%-Differenz errechnet. Zur Wasserverteilung unterhalb des Tropfschlauchs wurden keine Untersuchungen vorgenommen.

In den Gefäßversuchen wurde ab Mitte Mai zwei- bis dreimal wöchentlich jeweils die Wassermenge gegeben, die zur Erlangung des Sollwertes erforderlich war, wobei für eine Bewässerung ein Mindestwasserbedarf von 0.5 l/Pfl. bestehen musste. Zur Nährstoffversorgung erfolgte in den Feldversuchen eine betriebsübliche und einheitliche Mineraldüngung. Im FV 02-04 wurde am 26.07. und 04.08. des zweiten Standjahres zur Einwaschung des nach der Ernte oberflächlich ausgebrachten Mineraldüngers je 20 mm überkopf beregnet.

3.2.2 Versuchsauswertung

Pflanzenwuchs, -massen und -nährstoffgehalte

Im Rahmen der Pflanzenuntersuchungen (Tab. 3.3) wurde im FV 02-04 bei den Auswertungen im September um die zu rodenden Pflanzen Boden mit einem Volumen von 33 x 180 cm (0.6 m^2) Fläche und 50 cm Tiefe ausgehoben, alle

Wurzelteile herausgesiebt und vor der Gewichtsbestimmung gewaschen. Die Pflanzen wurden im ersten Standjahr zufällig und im zweiten gezielt, in Anlehnung an die erfassten Triebhöhen im August, ausgewählt. Die Pflanzenuntersuchungen erfolgten im September direkt nach Beendigung des Bewässerungszeitraumes, damit keine Wassereffekte kompensiert werden konnten. Im FV 00-04 wurden keine Pflanzenuntersuchungen vorgenommen. In GV 02 und GV 03 erfolgten die Pflanzenuntersuchungen nach dem Absterben des Krautes.

Tab. 3.3: Termine, Mess- und Probengröße der Pflanzenuntersuchungen

Versuch	Stdj.	Termin	Messgröße	Probengröße
FV 02-04	1.	19.-24.09.02	FM, TM, TM-, N-, P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte von Aufwuchs und Kronen	2 Pflanzen/Parzelle (Pfl./Parz.).
	2.	09.-18.09.03		
	2.	27.05.03, 13.06.03, 24.07.03, 13.08.03	Triebanzahl, -länge	jede 7. Pflanze in allen Parzellen, n=13 Pfl./Parz.
	3.	12.11.03 20.04.04, 26.05.04	Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln	Mischprobe aus 5 Pfl./Parz.
GV 02	1.	21.11.02	FM, TM, TM-, N-, P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte von Aufwuchs und Kronen	alle Pflanzen
GV 03	1.	30.10.03		

Stdj. = Standjahr

Ertrag (Rohertrag bzw. Feldware)

Der FV 02-04 wurde im zweiten Standjahr vom 16.04. bis 07.05.03 und im dritten vom 15.04. bis 03.06.04 zweimal täglich beerntet und der Rohertrag erfasst. Die Abdeckung erfolgte jeweils mit transparenter Antitau- und im dritten Jahr bis Erntebeginn zusätzlich mit transparenter Lochfolie. Im FV 00-04 wurde im siebten und achten Standjahr bei Abdeckung mit schwarz-weißer Taschenfolie vom 05.05. bis 04.06.03 bzw. 02.06.04 jeden zweiten Tag einmal geerntet und der Rohertrag zweimal wöchentlich erfasst. Die Qualität des Erntegutes wurde im FV 02-04 im zweiten Standjahr an fünf Terminen, im dritten zweimal sowie im FV 00-04 einmal wöchentlich bestimmt. Die Sortierung erfolgte abweichend von der EU-Qualitätsnorm für Spargel (Anonym, 1997) nur nach dem Durchmesser an der Stangenbasis und der Wuchsform: Super (>26 mm), Extra (16-26 mm), HKI I (12-15 mm), HKI II (8-11 mm) und HKI III (<8 mm oder krumm, u. ä.).

Berechnung der Wassernutzungseffizienz (WUE)

Da der exakte Wasserverbrauch des Spargels unter Feldbedingungen schwer erfassbar ist, wurde er mit Hilfe einer Wasserbilanz (Howell, 2001), die sich aus

Niederschlag, Bewässerungsmenge und Bodenwasseränderung in der Wurzelzone zusammensetzt, für FV 02-04 geschätzt und die WUE wie folgt berechnet:

$$\text{GV 02, 03:} \quad \text{WUE} = \frac{\text{TM-Zuwachs (g m}^{-2}\text{)}}{\text{Evapotranspiration Pflanztermin bis 15.09. (l m}^{-2}\text{)}}$$

$$\text{FV 02-04:} \quad \text{WUE} = \frac{\text{TM-Zuwachs 2002 bzw. 2003 (g m}^{-2}\text{)}}{\text{Wasserbilanz 01.05.-10.09. (l m}^{-2}\text{)}}$$

Die Bodenwasseränderung wurde von der Differenz des Wassergehalts am 01.05. und 10.09. des Standjahres und dem durchwurzelten Bodenvolumen abgeleitet, welches aus Bestandesdichte (1.68 Pfl./m²) und Durchwurzelungstiefe errechnet wurde. Für letztere wurde im ersten Standjahr 1 m und im zweiten 2 m angenommen, so dass insgesamt Wasservorräte von 80 bzw. 130 l/m² geschätzt wurden. Die WUE wurde für das zweite Jahr aus dem Pflanzenmassezuwachs zwischen den Auswertungen im September berechnet. Das Kronenwachstum bis zum Ende des jeweiligen Standjahres konnte nicht berücksichtigt werden. Die TM-Erträge der geernteten Spargelstangen wurden bei der Berechnung der WUE vernachlässigt.

Die Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes wurde nach Empfehlungen der FAO (Smith, 2006) nach der modifizierten PENMAN-Formel und den entsprechenden Koeffizienten von Paschold (1999) berechnet.

Nährstoffgehalte: Organische Dünger, Pflanze und Boden

Die Analysen der eingesetzten organischen Dünger erfolgten von der LUFA Hameln (FV 02-04, GV 02) oder am Institut für Gemüse- und Obstbau (FV 00-04, GV 03). In Anlehnung an die Güte- und Prüfbestimmungen der Bundesgütegemeinschaft Kompost (Anonym, 1994) wurden folgende Methoden angewandt:

P, K, Mg, Ca Königswasseraufschluss (Kap. II. 13.2)

Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn Königswasseraufschluss (Kap. II. 12)

C_t und N_t Elementaranalyse nach Dumas

NH₄-N + NO₃-N Extraktion mit 0.1 mol KCl-Lösung, Destillation

Salzgehalt, pH-Wert, organische Substanz, Volumengewicht, Wassergehalt (TS-Gehalt) und Rottegrad wurden, wie im VDLUFA-Methodenbuch (Anonym, 1991) beschrieben, bestimmt.

Die Analyseergebnisse sind dem Anhang (Tab. 8.1) zu entnehmen. Alle organischen Dünger lagen, sofern bestimmt, bezüglich ihrer Schwermetall- und organischen Schadstoffgehalte unterhalb der Richtwerte der Bioabfall- (BioAbfV) (Anonym, 1998) (Abb. 8.1) bzw. Klärschlammverordnung (Anonym, 1992). Ein Keimpflanzenversuch der LUFA Hameln mit Chinakohl wies auf pflanzenschä-

digende Stoffe im Champost hin. Bodenuntersuchungen erfolgten in den Gefäßversuchen zu Versuchsbeginn und -ende und in den Feldversuchen jährlich im Frühjahr (N_{\min} -Untersuchungen ganzjährig, siehe Anhang) in Anlehnung an die Methoden des VDLUFA (Anonym, 1991) am Institut für Gemüse- und Obstbau:

N_{\min} -Gehalte	Extraktion von 50 g feldfeuchtem Boden mit 100 ml 0.1 mol KCl-Lösung, photometrische Bestimmung von NO_3^- -gebundem N (Methode A 6.1.4.1) und NH_4^+ -N (DIN 38406). Umrechnung in kg/ha bezogen auf eine Schichtdicke von jeweils 30 cm unter der Annahme einer Lagerungsdichte von 1.4 g/cm ³ in 0-30 cm und 1.7 g/cm ³ in 30-60 und 60-90 cm Bodentiefe
pH-Wert	Suspension mit 0.025 m CaCl_2 -Lösung, pH-Elektrode
Salzgehalt	Wasserextrakt (1:10), elektrische Leitfähigkeit
Org. Substanz	Veraschung bei 550°C im Muffelofen
P_2O_5	Pflanzenverfügbares Phosphat, Extraktion CAL-Methode, photometrisch
K_2O	Pflanzenverfügbares Kalium, Extraktion CAL-Methode, Atom-Adsorptions-Spektralphotometer (AAS)
MgO	Pflanzenverfügbares Magnesium, Extraktion mit 0.025 n CaCl_2 -Lösung, AAS
CaO	Austauschbares CaO, Extraktion mit 0.5 n Natriumacetat (pH 8.2), AAS
C_t und N_t	Elementaranalyse nach Dumas

Die N-Gehalte im Pflanzenmaterial wurden nach Trocknung der Proben im Trockenschrank bei 105 °C und anschließendem Vermahlen mit Hilfe der Kjeldahlanalyse mit Nitratreduktion (Nelson & Sommers, 1973) bestimmt. Die P-Gehalte wurden nach trockener Veraschung des getrockneten und gemahlten Pflanzenmaterials im Muffelofen bei 500 °C photometrisch mit der Vanadat-Methode (Scheffer & Pajenkamp, 1951) und K-, Mg- und Ca-Gehalte am AAS bestimmt. Die Bestimmung der Kohlenhydratgehalte erfolgte in Anlehnung an das Entscheidungsunterstützungssystem *AspireNZ* (Wilson et al., 2002). Zimtbraune Speicherwurzeln ($\varnothing \geq 5$ mm) mit einer Gesamtlänge der Wurzelstücke von 15 cm wurden aus fünf Spatenaushüben pro Parzelle herausgelesen, zu einer Mischprobe vereinigt, gewaschen, eingefroren, zerkleinert und anschließend deren CH_2O -Gehalt mit einem Refraktometer (Krüss Optronic, Hamburg) in % Brix im zentrifugierten Presssaft bestimmt.

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm SAS[®] 8e (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) vorgenommen. Die erhobenen Daten wurden im Falle einer Spaltanlage mit PROC MIXED und in den übrigen Fällen mit der SAS-Prozedur PROC GLM varianzanalytisch getestet und einem Mittelwertsvergleich unterzogen (Tukey-Test), wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % galt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Gefäßversuche

Sättigungsdefizit der Luft und Evapotranspiration

Das Sättigungsdefizit der Luft (VPD) lag im Jahr 2003 im Mittel bei 7.4 hPa während der Krautwachstumsphase und war damit deutlich höher als 2002 mit durchschnittlich 4.7 hPa. Entsprechend war auch die gemessene Evapotranspiration (ET) der Spargelpflanzen 2003 mit durchschnittlich 81.5 l/Pfl. deutlich höher als 2002 mit durchschnittlich 59.7 l/Pfl. im gleichen Zeitraum. Im GV 03 waren während der gesamten Krautwachstumsphase Parallelen zwischen der ermittelten aktuellen ET der Spargelpflanzen und der Referenz-ET eines Spargelbestandes im ersten Standjahr erkennbar (Abb. 3.1a), wobei letztere nur Vergleichswerte liefert, die nicht ohne weiteres auf die Gefäßversuche übertragbar sind. Die Parallelen traten im GV 02 nur bis Anfang August auf (Abb. 3.1b), dann überstieg die aktuelle die Referenz-ET eines Spargelbestandes.

Das Sättigungsdefizit der Luft schien neben der Evapotranspiration auch das Kronen/Aufwuchs-Verhältnis der Spargelpflanzen, das zwischen den beiden Jahren stark differierte, zu beeinflussen (Abb. 3.1c). Unter Einbeziehung eines weiteren Gefäßversuches aus dem Jahr 2004 (GV 04) wird deutlich, wie ungewöhnlich hoch dieses mit durchschnittlich 7.2 im Jahr 2003 war.

Wassereffekte

Die Evapotranspiration der Spargelpflanzen war insgesamt in beiden Gefäßversuchen bei 50 % GK signifikant niedriger als bei den höheren Wasserstufen (Tab. 3.4), die sich diesbezüglich jeweils nicht signifikant voneinander unterschieden. Diese geringe Evapotranspiration der Spargelpflanzen führte dazu, dass die Effizienz des Wassereinsatzes, die WUE, bei 50 % GK trotz geringer TM-Zuwächse am höchsten war. Die TM-Zuwächse der 70 % GK-Varianten waren im GV 02 signifikant und im GV 03 tendenziell am höchsten, wobei sich die WUE der Varianten mit 50 % GK und 70 % GK nicht signifikant voneinander unterschieden. Bei der höchsten Wasserstufe führte das Mehrangebot an Wasser nicht zu entsprechend höheren TM-Zuwächsen, so dass die WUE in beiden Gefäßversuchen bei 85 % GK am geringsten war.

Wassereffekte bei Spargel traten in beiden Gefäßversuchen insbesondere beim Kronenwachstum auf (Tab. 3.5). Bei den Aufwuchsmassen und Kronen-

Aufwuchs-Verhältnissen waren jeweils keine Wassereffekte nachweisbar. Die N-Gehalte (% in TM) der 50 % GK-Varianten in Aufwuchs und Krone waren im GV 02 signifikant und im GV 03 tendenziell höher als bei den anderen Wasserstufen (Tab. 3.6). Die N-Akkumulation in der Kronen- und Gesamtpflanzenmasse zeigte im GV 02 eine signifikante Abnahme mit zunehmendem Wasserangebot (Abb. 3.1d) und blieb im GV 03 von der Wasserversorgung unbeeinflusst. Das K/Ca-Verhältnis, welches in der Regel mit zunehmendem Wassermangel ansteigt, wurde bei der Endauswertung für Aufwuchs und Krone bestimmt und ergab keine nachweisbaren Unterschiede zwischen den Wasserstufen. Das Ausbleiben des Augusttriebes, ein Zeichen für Wassermangel, konnte in beiden Gefäßversuchen unabhängig von der Wasserversorgung beobachtet werden. Die Triebspitzenwelke war insgesamt nicht zu beobachten.

N-Effekte

Der in GV 03 untersuchte Einfluss der Mineral-N-Versorgung auf das Spargelwachstum stellte sich als beträchtlich heraus. Bei höherem N-Angebot wurde auch signifikant mehr N aufgenommen (Tab. 3.6). Das gesamte ober- und unterirdische Wachstum der Spargelpflanzen wurde dadurch bei dem höheren gegenüber dem niedrigen N-Angebot so deutlich gesteigert, dass die WUE um knapp 30 % gegenüber den geringer mit N versorgten Pflanzen zunahm (Tab. 3.4).

Komposteffekte

Die Effekte der Fertigkomposte auf das Spargelwachstum im Vergleich zur jeweiligen Kontrolle waren in den Gefäßversuchen nicht einheitlich. So erzielten die Kontroll-Varianten im GV 02 insgesamt die höchsten TM-Zuwächse, unterschieden sich aber bei der WUE nicht signifikant von den FK 02-Varianten (Tab. 3.4). Im GV 03 hingegen waren die Kontroll- den FK 03-Varianten sowohl hinsichtlich der TM-Zuwächse als auch bezüglich der WUE unterlegen. Unter den organisch gedüngten Varianten erzielten die Fertigkompost-Varianten im GV 02 die signifikant und im GV 03 die tendenziell höchsten TM-Zuwächse. Die WUE war in beiden Gefäßversuchen bei den mit Fertigkompost gedüngten Varianten signifikant höher als bei den anderen organisch gedüngten Varianten.

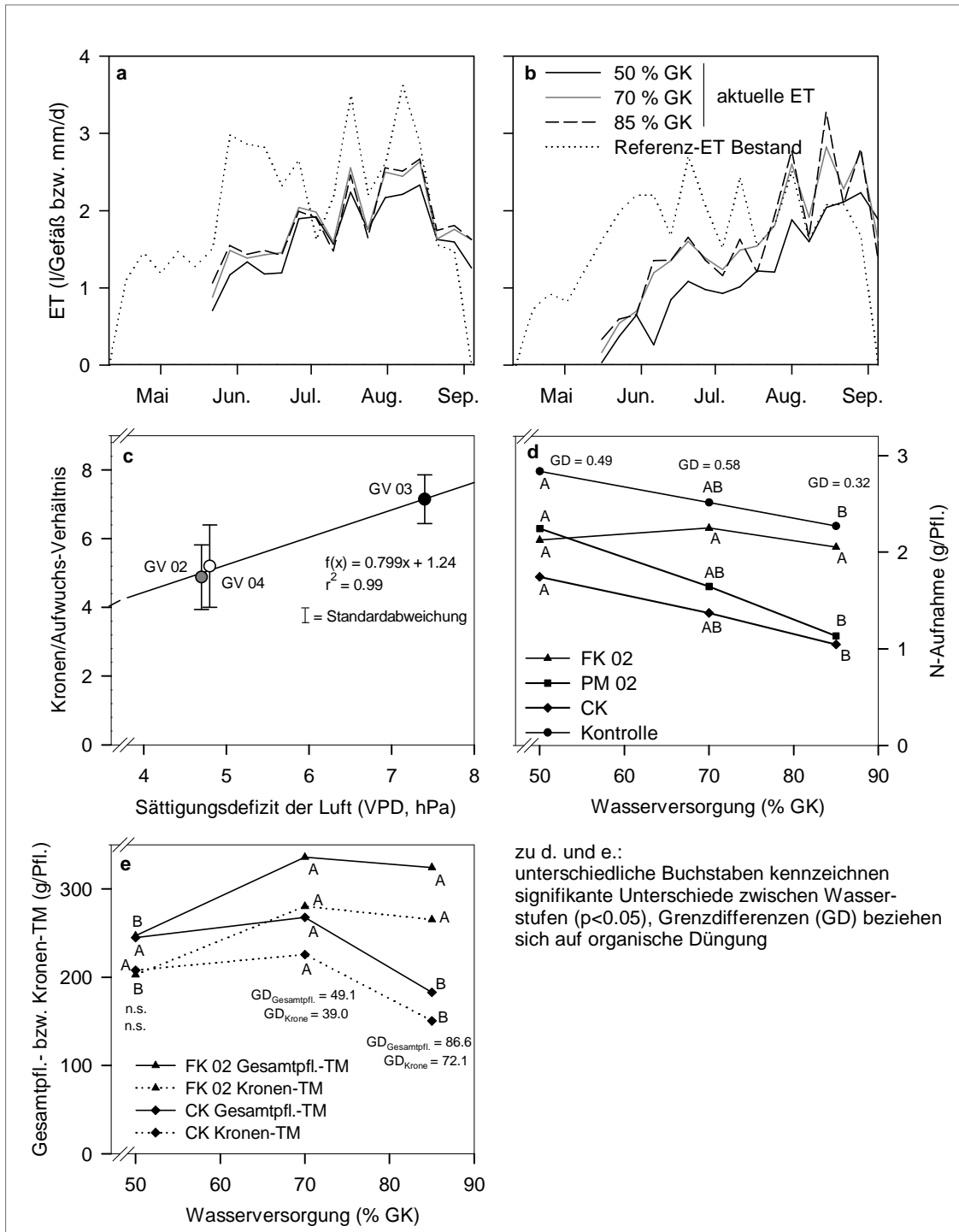


Abb. 3.1: Aktuelle Evapotranspiration (ET) des Spargels (l/Gefäß) im GV 03 (a) und GV 02 (b) (Mittelwerte über organische Düngung und N-Stufen) und Referenz-ET eines Spargelbestandes (mm/d) im 1. Standjahr (jeweils Wochenmittel), Beziehung zwischen dem Sättigungsdefizit der Luft und dem Kronen/Aufwuchs-Verhältnis von Spargel aus drei Gefäßversuchen (c) (jeweils Mittelwerte aller Varianten) und Wechselwirkungen zwischen Versuchsfaktoren bei N-Akkumulation in der Gesamtpflanzenmasse (d) sowie Gesamtpflanzen- und Kronen-TM (e) im GV 02 bei Endauswertung

Tab. 3.4: Evapotranspiration, TM-Zuwächse und Wassernutzungseffizienz (WUE) der Spargelpflanzen im GV 02 und GV 03, Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Evapotranspiration (l/Pfl.)		TM-Zuwachs (g/Pfl.)		WUE (g/l)	
	GV 02	GV 03	GV 02*	GV 03	GV 02*	GV 03
50 % GK	51.0 B	75.3 B	240.1 B	237.5	4.7 A	3.1 A
70 % GK	64.3 A	84.1 A	290.7 A	259.4	4.5 A	3.1 AB
85 % GK	63.7 A	85.2 A	252.5 B	251.2	3.9 B	2.9 B
FK 02, 03	60.5 ab	83.2	282.4 b	270.0 a	4.7 a	3.2 a
PM 02, 03	57.5 b	81.4	234.0 c	247.8 ab	4.1 b	3.0 b
CK	57.0 b	-	211.8 c	-	3.7 b	-
Kontrolle	63.8 a	80.0	316.3 a	230.3 b	5.0 a	2.9 b
Niedr. N-Angebot	-	78.0 b'	-	218.6 b'	-	2.8 b'
Hohes N-Angebot	-	85.1 a'	-	280.1 a'	-	3.6 a'
Mittelwert	59.7	81.5	261.1	249.4	4.4	3.1

* Wechselwirkungen zwischen Wasserstufe und organischer Düngung im GV 02 (siehe Abb. 3.1e)

Tab. 3.5: Pflanzenmassen (g TM/Pfl.) im GV 02 und GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Aufwuchs		Krone		Rhizom	
	GV 02*	GV 03	GV 02*	GV 03	GV 02	GV 03
50 % GK	46.7	32.6	213.4 B	231.9	15.1	15.8 B
70 % GK	52.4	35.5	258.2 A	250.9	18.6	18.1 AB
85 % GK	48.4	34.4	224.2 B	243.9	16.8	21.5 A
FK 02, 03	52.9 ab	37.4 a	249.4 a	259.6 a	16.5 ab	19.1
PM 02, 03	44.3 bc	34.1 ab	209.7 b	240.7 ab	16.3 ab	19.6
CK	37.1 c	-	194.7 b	-	14.0 b	-
Kontrolle	62.4 a	31.0 b	273.9 a	226.3 b	20.5 a	16.8
Niedr. N-Angebot	-	30.0 b'	-	215.6 b'	-	16.3 b'
Hohes N-Angebot	-	38.3 a'	-	268.8 a'	-	20.6 a'
Mittelwert	49.2	34.2	231.9	242.2	16.8	18.5

* Wechselwirkungen zwischen Wasserstufe und organischer Düngung im GV 02 (siehe Abb. 3.1e)

Wechselwirkungen

Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren traten nur in GV 02 auf. Die Produktion der Kronen- und Ganzpflanzen-Trockenmassen der PM 02- und Kontroll-Varianten wurde nicht von der Wasserversorgung beeinflusst und die der FK 02- und CK-Varianten war gegensätzlich: Während die TM-Produktion der FK 02- mit zunehmender Wasserversorgung anstieg, nahm diese bei den CK-Varianten ab. Entsprechend konnte die bei einer Wasserversorgung von

85 % GK gegenüber den niedrigeren Wasserstufen reduzierte WUE auch nur bei den CK-Varianten statistisch abgesichert werden (Abb. 3.1e). Bei der niedrigen Wasserstufe waren im Gegensatz zu den anderen bezüglich der Kronen- und Gesamtpflanzenmassen sowie der WUE keine Unterschiede zwischen den organischen Düngern nachweisbar. Bei den FK 02-Varianten nahm die N-Akkumulation in den Kronen- und Gesamtpflanzenmassen im Gegensatz zu den anderen organisch gedüngten Varianten nicht mit zunehmender Wasserversorgung ab (Abb. 3.1d).

Tab. 3.6: N-Gehalte in der Pflanzenmasse im GV 02 und GV 03 und N-Akkumulation in den Pflanzen im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Aufwuchs (% in TM)		Krone (% in TM)		Gesamtpflanze (g/Pfl.)
	GV 02	GV 03	GV 02	GV 03	GV 03
50 % GK	0.79 A	0.85	0.87 A	0.53 A	1.48
70 % GK	0.69 B	0.83	0.61 B	0.47 B	1.47
85 % GK	0.66 B	0.82	0.57 B	0.48 AB	1.44
FK 02, 03	0.76 a	0.85	0.72 ab	0.51	1.60 a
PM 02, 03	0.66 b	0.84	0.66 bc	0.51	1.50 b
CK	0.69 ab		0.58 c		
Kontrolle	0.76 a	0.82	0.78 a	0.47	1.30 c
Niedr. N-Angebot		0.84		0.48	1.28 b'
Hohes N-Angebot		0.83		0.50	1.65 a'

3.3.2 Feldversuche

Wassereffekte

Wie bereits erwähnt, war die Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes ebenso wie das Sättigungsdefizit der Luft (VPD) im FV 02-04 im trockenen zweiten Standjahr (2003) deutlich höher als im niederschlagsreichen ersten (2002) (Abb. 3.2a,b; Tab. 3.7). Im ersten Standjahr konnte erst gegen Ende des üblichen Bewässerungszeitraumes in Wasserstufen differenziert werden, was dazu führte, dass Wassereffekte im ersten Standjahr erwartungsgemäß nicht auftraten. Die Wasserversorgung der 50 % nFK-Varianten wies im zweiten Standjahr den Erwartungen entsprechend deutliche Differenzen zur Referenz-ET eines Spargelbestandes auf, während die Wasserversorgung der 85 % nFK-Varianten dem in beiden Jahren gerecht zu werden schien. Das Mehrangebot

an Wasser der 85 % nFK- führte aber nicht zu nachweisbar höheren TM-Zuwächsen, so dass die WUE geringer war als bei den 50 % nFK-Varianten. Wassereffekte wurden im zweiten Standjahr im Gegensatz zu den Gefäßversuchen beim Wachstum des oberirdischen Aufwuchses sichtbar, wobei die 85 % nFK- gegenüber den 50 % nFK-Varianten höhere mittlere Triebblängen produzierten. Sichtbare Anzeichen von Wassermangel bei Spargel wie die Triebspitzenwelke und das Ausbleiben des Augusttriebes traten nicht hervor. Der Verlauf der kumulierten Triebblängen wies jedoch eine vorübergehende Wachstumsstagnation sechs Wochen nach Stechende in allen Varianten auf (Abb. 3.2c). Die Aufwuchsmassen und N-Gehalte im Aufwuchs der 85 % nFK-Varianten waren zum Ende der Krautwachstumsphase im September tendenziell bzw. signifikant höher als bei niedriger Wasserstufe (Tab. 3.8). Die insgesamt aufgenommene N-Menge der 85 % nFK- war tendenziell höher als bei den 50 % nFK-Varianten. Die Kronen- und Rhizom-Trockenmassen der 85 % nFK- blieben tendenziell bzw. signifikant hinter denen der 50 % nFK-Varianten zurück. Das Kronen/Aufwuchs-Verhältnis war somit bei hoher Wasserstufe tendenziell geringer als bei der niedrigen.

Tab. 3.7: Wasserbilanz (01.05. - 10.09.) und -nutzungseffizienz (WUE) der Spargelpflanzen im 1. und 2. Standjahr von FV 02-04, Mittelwerte über organische Düngung, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	1. Standjahr		2. Standjahr	
	50 % nFK	85 % nFK	50 % nFK	85 % nFK
Niederschlag (l/m^2)	315	315	99	99
Unterflur-Tropfbewässerung (l/m^2)	0	37	41	209
Überkopf-Bewässerung (l/m^2)	0	0	40	40
Bodenvorrat (l/m^2)	80	80	130	130
Summe (l/m^2)	395	432	310	478
TM-Zuwachs (g/m^2)	388.1	423.9	877.5	862.0
WUE (g/l)	1.0	1.0	2.8 A	1.8 B

Obwohl keine Effekte der Wasserversorgung bei den Kohlenhydratgehalten und -reserven der Spargelpflanzen nachweisbar waren (Tab. 8.16, Anhang), traten deutliche Wassereffekte beim Stangenenertrag auf (Tab. 3.9). In der ersten Maihälfte des dritten Standjahres wurden bei hoher Wasserstufe tendenziell höhere Tageserträge als bei niedriger Stufe produziert, die insgesamt zu einem etwa

8 % höheren Rohertrag führten. Das mittlere Stangengewicht und der Anteil der Handelsklasse (HKI) Extra am Ertrag nahmen vom zweiten auf das dritte Standjahr deutlich zu und reagierten positiv auf eine hohe Wasserversorgung.

Komposteffekte

Insgesamt waren in beiden Feldversuchen keine positiven Effekte eines Komposteinsatzes auf das Wachstum und den Ertrag von Spargel im Vergleich zu einem anderen organischen Dünger nachweisbar. In beiden Feldversuchen wirkte sich jedoch eine (erneute) organische Düngung positiv auf den Ertrag aus. Diese Ertragssteigerungen betragen im FV 00-04 im siebten Jahr ca. 19 % und im achten 14 % (Abb. 3.2d). Darüber hinaus führte die erneute organische Düngung im FV 00-04 zu 4 - 5 % signifikant höheren mittleren Stangengewichten sowie einem höheren Anteil der HKI Extra am Ertrag im Vergleich zu den Varianten ohne erneuter organische Düngung (Abb. 3.2e).

Tab. 3.8: Pflanzentrockenmassen (g TM/Pfl.) und N-Gehalte im Aufwuchs (% in TM) im September des 1. und 2. Standjahres im FV 02-04; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

Standjahr		Pflanzentrockenmasse			Kronen/Aufwuchs-Verhältnis	N-Gehalte im Aufwuchs
		Aufwuchs	Krone	Rhizom		
1.	50 % nFK	129.3	101.7	12.5	0.8	2.05
	85 % nFK	135.8	116.5	14.1	0.9	2.02
	FK 02	120.2	101.6	10.5 b	0.9	2.04
	PM 02	133.9	114.8	14.3 ab	0.9	2.00
	CK	154.5	112.6	15.7 a	0.7	2.01
	Kontrolle	121.6	107.5	12.9 ab	0.9	2.08
2.	50 % nFK	267.1	356.9	36.3 A	1.5	1.75 B
	85 % nFK	341.1	288.5	29.4 B	0.9	1.87 A
	FK 02	291.9	327.7	31.8	1.2	1.85
	PM 02	354.7	331.8	36.1	1.1	1.83
	CK	268.0	308.6	30.9	1.3	1.77
	Kontrolle	301.9	322.7	32.6	1.3	1.78

Im FV 02-04 fiel auf, dass die CK-Varianten im zweiten Standjahr tendenziell die geringsten Pflanzenmassen produzierten und in der darauffolgenden Ernte eine signifikant geringere Qualität der Spargelstangen gegenüber den anderen Varianten hervorbrachten. In der Tendenz wiesen die CK-Varianten auch niedrigere Bodenwassergehalte als die anderen Varianten mit organischer Düngung

auf (Abb. 3.2f), was auf eine geringere Wasserkapazität hindeutet. Die WUE blieb von der organischen Düngung unbeeinflusst. Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren konnten nicht nachgewiesen werden.

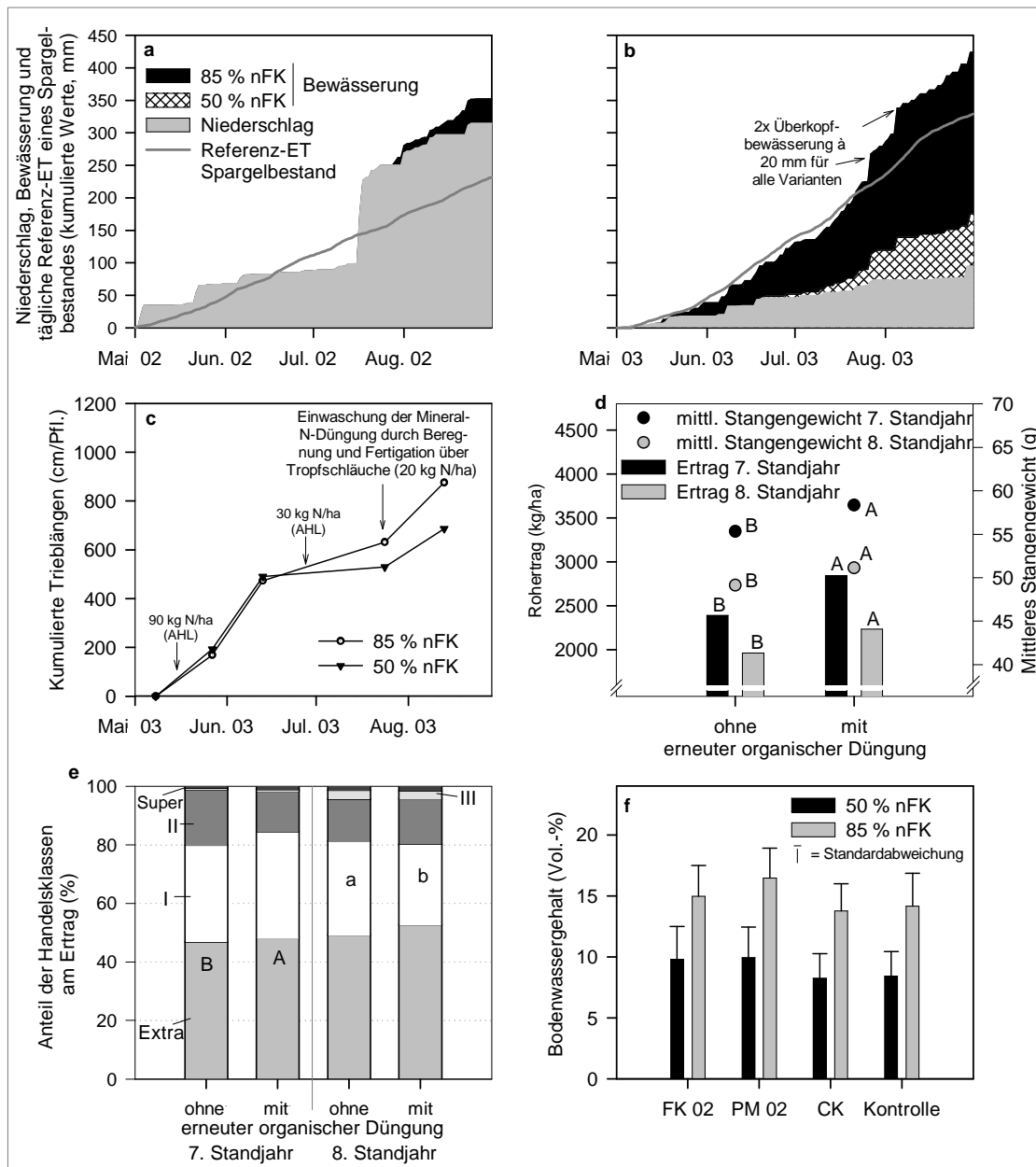


Abb. 3.2: Niederschlag und Unterflur-Tropf- bzw. Überkopfbewässerung im FV 02-04 von Mai bis August im 1. (a) und 2. (b) Standjahr im Vergleich zur Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes in den gleichen Zeiträumen, kumulierte Triebblängen pro Pflanze im 2. Standjahr (c), Rohertrag, mittleres Stangengewicht (d) und prozentualer Anteil der Handelsklassen am Ertrag (e) im FV 00-04 im 7. und 8. Standjahr und Mittelwerte der Bodenwassergehalte der Varianten aus 22 Messungen mit TDR-Sonden von Mai bis Sept. 03 im FV 02-04 (f), in a - e Mittelwerte über organische Düngung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

Tab. 3.9: Erntemengen, mittleres Stangengewicht und Anteil der HKI Extra am Ertrag im FV 02-04 im 2. und 3. Standjahr (Stdj.), Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Rohertrag				mittleres Stangengewicht			Anteil der HKI Extra am Ertrag	
	2. Stdj.		3. Stdj.		2. Stdj. g	3. Stdj.		2. Stdj. %	3. Stdj. %
	kg FM/ha	%*	kg FM/ha	%*		g	%*		
50 % nFK	3200	100	9295	100	60	65 B	100	58.6	68.9 B
85 % nFK	3194	100	10022	108	62	71 A	109	62.0	71.8 A
FK 02	3223	105	9761	104	62	68	100	65.9	71.4 a
PM 02	3201	105	9747	104	61	69	102	58.5	71.4 a
CK	3302	108	9749	104	60	67	99	61.4	67.5 b
Kontrolle	3062	100	9378	100	60	68	100	55.5	71.0 a

* in Prozent der niedrigen Wasserstufe bzw. der Kontrolle

3.4 Diskussion

Spargel wird überwiegend auf Sandböden mit geringer Sorptionsfähigkeit für Nährstoffe und geringer Feldkapazität angebaut. Durch den Einsatz organischer Dünger kann die Wasserspeicherkapazität des Bodens erhöht und das Risiko von Auswaschungsverlusten durch zusätzliches Sorptionspotenzial vermindert werden. Das Ziel dieser Untersuchungen war es daher, experimentell den Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf das Wachstum, den Ertrag und die WUE von Spargel zu ermitteln.

3.4.1 Wassereffekte bei Spargel

Die in den Gefäß- und Feldversuchen ermittelten Wassereffekte bei Spargel waren insgesamt nicht einheitlich. Aus Untersuchungen von Bloom (2003), Cannell & Takatori (1970), Drost (1996), Wilcox (1985) sowie Wilcox-Lee & Drost (1990) ging hervor, dass Spargel auf sinkende Wasserversorgung mit deutlichen Reduktionen der Aufwuchsmassen reagiert. Diese resultieren aus der Abnahme des Xylem-Potenzials des Spargels (Ψ_{Xylem}), der stomatären Leitfähigkeit sowie der Transpirations- und Photosyntheserate, welche besonders empfindlich auf sinkende Wasserversorgung reagieren und eng mit dem Wasserpotenzial des Bodens (Ψ_{Boden}) korrelieren (Drost & Wilcox-Lee, 1990; Wilcox-Lee & Drost, 1990). Eine Reduzierung der Aufwuchsmasse des Spargels mit sinkender Wasserversorgung konnte nur tendenziell im FV 02-04 bestätigt werden. Wassereffekte auf den CH_2O -Gehalt der Speicherwurzeln, die Drost & Wilcox-Lee (1997a) feststellten, konnten nicht nachgewiesen werden. Während die Triebspitzenwelke als sichtbares Anzeichen von Wassermangel bei Spargel insgesamt nicht beobachtet werden konnte, blieb der Augusttrieb in den Gefäßversuchen jedoch unabhängig von der Wasserversorgung aus.

Die Gesamtpflanzen-, Kronen-, Faser- und Speicherwurzelmassen nahmen mit sinkender Wasserversorgung bei Wilcox-Lee & Drost (1990) von -0.05 bis -1.5 MPa exponentiell sowie bei Drost (1996) bei einer Bewässerungsrate von 80 % ET auf 0 % ET und Drost & Wilcox-Lee (1990) von -0.05 auf -0.5 MPa linear ab, was im wesentlichen auf eine Reduktion der Speicher- und Faserwurzelanzahl zurückzuführen war (Drost, 1999a). Eine Abnahme der Gesamtpflanzen- und Kronenmassen mit sinkender Wasserversorgung konnte nur für

die FK 02-Varianten im GV 02 nachgewiesen werden, die CK-Varianten reagierte entgegengesetzt.

Hinweise auf Wassermangel bei niedriger Wasserstufe ergab im GV 02 auch die Nährstoffaufnahme. Zwischen den Pflanzenmassen und der darin gebundenen N-Menge (g/Pfl.) bestand insgesamt wie bei Geissler (1981) eine enge Beziehung, wobei die niedrige Wasserstufe im GV 02, die bei relativ geringen Pflanzenmassen relativ hohe N-Gehalte und -Reserven (g/Pfl.) aufwies, eine Ausnahme bildete. Dies deutete darauf hin, dass den Pflanzen bei niedriger Wasserstufe ein erhöhtes N-Angebot durch höhere Mineralisationsraten zur Verfügung stand (Zöttl, 1968), was sie aber aufgrund von Wassermangel nicht in TM-Produktion umsetzen konnten. Derartige Tendenzen konnten auch im GV 03 bei hoher N-Stufe beobachtet werden. Darüber hinaus deutete auch eine relativ geringe Ca-Aufnahme (g/Pfl.) auf Wasserdefizite bei niedriger Wasserstufe im GV 02 hin (Wuchner & Hartmann, 1975).

Ein zunehmendes Kronen/Aufwuchs-Verhältnis bei abnehmender Wasserversorgung stellt in der Regel einen Indikator für Trockentoleranz dar und konnte auch in Untersuchungen von Wilcox-Lee & Drost (1990) nicht aber in den vorgestellten Versuchen bei Spargel festgestellt werden.

Der Ertrag konnte im FV 02-04 auf humosem Sandboden bei hoher Wasserstufe tendenziell gegenüber der niedrigen gesteigert werden. Bei Battilani (1997) und Wilson et al. (1996) wirkte sich eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität im Gegensatz zu Drost (1999b) sowie Roth & Gardner (1989, 1990) nicht ertragssteigernd aus, was auf unterschiedliche Böden zurückgeführt werden kann. Denn Bewässerungseffekte treten auf Sandboden deutlich stärker hervor als etwa auf sandigem Lehm (Hartmann, 1981). Cannell & Takatori (1970) erzielten bei einem Saugdruck von -0.8 bis -5 bar höhere Erträge als bei geringem Saugdruck. Bei nahezu allen Autoren führte eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität zur Qualitätsverbesserung in Form dickerer Stangen (Battilani, 1997; Drost & Wilcox-Lee, 1997b; Roth & Gardner, 1989, 1990), was auch im FV 02-04 im dritten Standjahr festgestellt werden konnte. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass der Durchmesser einer Spargelstange von der Knospengröße abhängt (Billau, 1986). Diese, deren Lebensfähigkeit und Anzahl kann bei abnehmender Wasserversorgung beeinträchtigt werden (Drost, 1996; Drost & Wilcox-Lee, 1990, 1997a,b).

3.4.2 Komposteffekte bei Spargel

Organische Düngung kann das Pflanzenwachstum direkt über Nährstoffwirkungen (Bischoff, 1987; Bohne et al., 1996) und indirekt vor allem über die Erhöhung der Wasserspeicherkapazität des Bodens beeinflussen (Kaufmann et al., 1977; Mamo et al., 2000), da diese oft ertragsbegrenzend ist. In den vorgestellten Versuchen waren die Effekte der organischen Düngung auf das Wachstum von Spargel uneinheitlich. In den Gefäßversuchen förderte der Fertigkompost-einsatz das Wachstum von Spargel gegenüber den anderen eingesetzten organischen Düngern und der Kontrolle (nur GV 03). Im FV 02-04 hingegen konnten keine Komposteffekte auf das Wachstum von Spargel nachgewiesen werden.

Wassereffekte der organischen Düngung führten in Untersuchungen von Paschold et al. (2000) zu Ertragssteigerungen sowie bei Hartmann & Hermann (1986) zur Verzögerung der Alterung der Spargelanlage, d. h. des allmählichen Rückgangs der HKI Extra. In den vorgestellten Feldversuchen blieb die Ertrags-höhe von der Art der organischen Düngung unbeeinflusst. Der Einsatz von Champost führte jedoch zu Qualitätsbeeinträchtigungen (s.u.). Im FV 00-04 äußerten sich mittelfristige Effekte der organischen Düngung in Ertrags- und Qualitätssteigerungen im siebten und achten Standjahr der im vierten Standjahr erneut organisch gedüngten Varianten. Dabei kann der ertragssteigernde Einfluss der erneuten organischen Düngung vermutlich auf Nährstoff- und pH-Effekte zurückgeführt werden. Die K-Gehalte entsprachen im Frühjahr der Versuchsjahre stets denen der Bodengehaltsklassen A - B und waren bei den erneut organisch gedüngten Varianten tendenziell höher als bei denen ohne erneute organische Düngung. Hartmann (1988) fand deutliche K-Effekte bei der Sortierung von Spargel. Die organische Düngung führte wie bei Bohne et al. (1996) und Bischoff (1987) im FV 00-04 zu einer leichten und in den Gefäßversuchen zu einer deutlichen Anhebung des pH-Wertes. Wassereffekte waren im FV 00-04 bei einer einmaligen organischen Düngung in der Größenordnung und dem langen Zeitraum nicht mehr zu erwarten (Bohne et al., 1996; Bischoff, 1987).

Das gegensätzliche Verhalten der CK- und FK 02-Varianten in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im GV 02 könnte zum einen auf stärkere O₂-Mangeleffekte der CK-Varianten zurückgeführt werden, wobei jedoch keine Untersuchungen zur Porosität vorgenommen wurden. Relativ geringe Bodenwasser-gehalte der CK-Varianten im FV 02-04 deuteten aber auf eine geringere Was-

serkapazität gegenüber den anderen organisch gedüngten Varianten hin. Auch der relativ hohe Gehalt an leicht zersetzbarer organischer Substanz im Champost (Kap. 5) kann infolge des O₂-zehrenden Prozesses der Mineralisation zu verstärktem O₂-Mangel, Denitrifikationsverlusten (Schloemer, 1991) und Toxizitäten (NO₂, Monocarbonsäuren) geführt haben. Zum anderen ergab ein Keimpflanzentest Hinweise auf phytotoxische Substanzen im Champost, die auch für die Qualitätsminderung im FV 02-04 verantwortlich sein konnten. Phytotoxische Substanzen können sich bei der Zersetzung pflanzlicher Stoffe bilden. Vor allem Komposte mit geringem Rottegrad können daher solche ertragsmindernden Stoffe enthalten (Ozores-Hampton et al., 1998). Aus einem Inkubationsversuch (Kap. 5) ging hervor, dass der Rottegrad des Champosts eher einem Frisch- als einem Fertigkompost entsprach, dem er von der LUFA Hameln (Tab. 8.1) zugeordnet wurde. Auch der relativ hohe Salzgehalt des Champosts von 17.9 g/l (im Vergleich: FK 02: 3.2 g/l) kann bei Einarbeitung im späten Frühjahr zu Qualitätsminderungen bei Spargel führen (Anonym, 1999a), wenngleich Spargel als relativ salztolerant gilt (Daningsih et al., 2004).

Der verwendete Pferdemist wies ein C/N-Verhältnis von 29 auf. Eine vorübergehende N-Immobilisierung ist ab C/N > 15 zu erwarten (Gutser & Ebertseder, 2002) und kann ohne Ausgleichdüngung zu Wachstumshemmungen führen (Bohne et al., 1996). N-Immobilisation und eine anschließend verzögerte Mineralisation konnten in einem Inkubationsversuch (Kap. 5) nachgewiesen werden.

3.4.3 Validität der ermittelten Effekte

Inhomogenität der Spargelpflanzen

Aufgrund der Inhomogenität des Spargels (Sinton & Wilson, 1999) empfiehlt Aldenhoff (2005), Untersuchungen mit zehn Pflanzen pro Variante vorzunehmen. Aus versuchstechnischen Gründen konnten die Untersuchungen in den Gefäßversuchen nur mit drei Wiederholungen durchgeführt werden. Die Heterogenität des Spargels sollte dabei durch die Auswahl gleich schwerer Jungpflanzen reduziert werden, so dass der Versuchsumfang insgesamt als groß genug betrachtet wurde. Im FV 02-04 basierten die Pflanzenuntersuchungen im September jeweils auf sechs Pflanzen pro Variante. Zur Reduzierung der Heterogenität erfolgte dabei im zweiten Standjahr eine gezielte Entnahme der Pflanzen mit mittlerer kumulierter Triebblänge der zuvor im August diesbezüglich 39 unter-

suchten Pflanzen pro Variante. Der Ertrag und die Qualität des Erntegutes lieferten mit knapp 300 untersuchten Pflanzen die aussagekräftigsten Ergebnisse. Die Untersuchungen zum CH_2O -Gehalt der Speicherwurzeln konnten nur Anhaltspunkte liefern, denn Wilson et al. (2002) stellten fest, dass aufgrund der beträchtlichen Variation der CH_2O -Gehalte zwischen Spargelpflanzen eines Bestandes mindestens 20 Wurzelproben für zuverlässige Schätzungen des mittleren CH_2O -Gehaltes erforderlich sind. Da dieses bei der Parzellengröße zu Beeinträchtigungen des Pflanzenwachstum geführt hätte, wurde darauf verzichtet.

Inhomogenität der organischen Dünger

Die eingesetzten organischen Dünger weisen aufgrund ihrer variierenden Zusammensetzung eine große Inhomogenität auf. Beim Pferdemist kann vor allem der Strohanteil, der für die N-Immobilisierung verantwortlich ist (Nordmeyer, 1985), erheblich schwanken. Auch bezüglich der Nährstoffgehalte sind bei den organischen Düngern deutliche Schwankungen zu beachten (Poletschny, 1992). Im GV 02 wies die Kontrolle wider den Erwartungen einen höheren Gehalt an organischer Substanz als die Substratgemische auf. Diese Abweichungen zeigen, dass die organischen Dünger und Substrate trotz intensiver Durchmischung ein sehr inhomogenes Material darstellten, wobei die verwendeten Mengen zu berücksichtigen sind. Zudem erklären sie auch das gute Abschneiden der Kontroll-Varianten im GV 02 im Vergleich zum GV 03.

Methodenbegrenzungen

Für die 34 I-Gefäße in den Gefäßversuchen wurden relativ kleine Jungpflanzen (\varnothing 65 g) ausgewählt. Im GV 03 konnte aber nicht ausgeschlossen werden, dass Wachstumsbegrenzungen durch die Gefäße zum Ausbleiben der Wassereffekte führten. Dabei könnten die hohen Kronen/Aufwuchs-Verhältnisse im Vergleich zu GV 02 Folge des relativ hohen VPD in 2003 oder des Temperaturstress im Wurzelraum der oberirdisch aufgestellten Gefäßpflanzen, der die relative Förderung des Wurzelwachstums zur Folge hatte, gewesen sein.

Infolge fehlender Niederschläge kam es im FV 02-04 im Juli des zweiten Standjahres vermutlich zu einer N-Unterversorgung, worauf N_{\min} -Untersuchungen im Wurzelraum ($< 20 \text{ kg N/ha}$, Abb. 8.2, Anhang) hinwiesen (Anonym, 2001a). Die Einwaschung des oberirdisch ausgebrachten Mineral-N-Düngers in den Wurzel-

raum löste vermutlich den Augusttrieb aus. Die Effekte des N-Mangels auf das Wachstum können bedeutend gewesen sein (Hirsch, 1985; Komnik, 1994, Geissler, 1981). Ein Vergleich der Nährstoffrelationen mit Literaturwerten (Paschold, 2001; Hartmann, 1994) und den Gefäßversuchen deutete zudem auf eine relativ geringe K-Aufnahme der Pflanzen im FV 02-04 hin. Ursache hierfür war, dass der FV 02-04 auf einem K-Mangelstandort durchgeführt wurde und es trotz regelmäßiger Mineraldüngung nicht gelang, den K-Gehalt des Bodens dauerhaft in die Gehaltsklasse B anzuheben. Die Nährstoffmangel-Effekte sind in Zusammenhang mit der Verwendung einer Unterflur-Tropfbewässerung zu sehen und wären durch Fertigation vermeidbar gewesen. Um Wechselwirkungen mit der Wasserversorgung zu vermeiden, wurde darauf jedoch verzichtet. In einem Gefäßversuch (GV 04, Kap. 4) konnte zudem eine mögliche Beeinträchtigung des Kronenwachstums durch Unterflur- gegenüber Überflur-Tropfbewässerung nachgewiesen werden, deren Ursache aber nicht abschließend geklärt werden konnte.

Obwohl insgesamt kaum Wassereffekte bei Spargel nachweisbar waren, was teilweise auch mit dem Einfluss anderer wachstumsbegrenzender Faktoren zu begründen ist, so deutete der positive Einfluss der hohen Bewässerungsstufe (85 % nFK) auf den Ertrag im FV 02-04 im Vergleich zur niedrigen (50 % nFK) doch auf eine Bestätigung der These, dass eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität zur Maximierung des Ertrages erforderlich sei, hin. Da es jedoch im FV 02-04 keine mittlere Wasserstufe gab, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass bereits ein Wasserangebot von 70 % nFK zur Ertragsmaximierung ausgereicht hätte, worauf die Ergebnisse aus den Gefäßversuchen hindeuteten. Allgemein gilt, dass die Nutzung des Wachstumsfaktors Wasser gemessen an der Stoffproduktion mit zunehmender Wasserversorgung ineffizienter wird, was auch Cannell & Takatori (1970) für den Spargelertrag feststellten. Eine niedrige Wasserversorgung des Spargels bei 50 % nFK stellte auch in den vorliegenden Versuchen unter ökologischen Gesichtspunkten, gemessen an der WUE, ein Optimum dar, reichte aber nicht aus, um den Wasserbedarf von Spargel zu decken, was im GV 02 und FV 02-04 gezeigt werden konnte. Insgesamt minderte eine Wasserversorgung bei 70 % GK gegenüber 50 % GK die WUE nicht. Die These, dass der Einsatz von Fertigkompost die WUE von Spargel mehr steigert als der üblicherweise eingesetzte Pferdemist, konnte zumindest in den

Gefäßversuchen bestätigt werden. Die Ursache dafür konnte jedoch nicht eindeutig geklärt werden. Neben niedrigeren Humusgehalten und Wasserkapazitäten der Pferdemist- gegenüber den Fertigkompost-Varianten, die nicht nachweisbar waren, konnte auch eine vorübergehende N-Immobilisierung zu Wachstumsbeeinträchtigungen des Spargels bei Einsatz von Pferdemist geführt haben. Die zentrale Bedeutung einer optimalen N-Versorgung konnte im GV 03 gezeigt werden. Mit dem Einsatz von Pferdemist konnte die WUE gegenüber einer Kontrolle in keinem Versuch gesteigert werden.

3.5 Schlussfolgerungen

In den dargestellten Untersuchungen waren insgesamt kaum Wassereffekte bei Spargel nachweisbar, was zum einen mit der allgemeinen Inhomogenität des Spargels und zum anderen teilweise auch mit dem Einfluss anderer wachstumsbegrenzender Faktoren zu begründen ist. Dennoch können folgende Schlüsse aus den Untersuchungen zum Einfluss von Wasserversorgung und organischer Düngung auf das Wachstum und den Ertrag von Spargel gezogen werden:

1. Die Untersuchungen zeigen, dass Spargel entgegen früherer Annahmen lediglich in die Gruppe der moderat trockentoleranten Pflanzen einzustufen ist. Denn eine Wasserversorgung von 85 % nFK erhöhte gegenüber einer von 50 % nFK den Rohertrag um 8 % und steigerte das mittlere Stängengewicht und den Anteil der HKI Extra am Ertrag. Eine Wasserversorgung von 50 % nFK reicht somit nicht aus, um den Wasserbedarf von Spargel zu decken.
2. Organische Düngung führt in den ersten beiden Jahren nach der Ausbringung tendenziell zu Ertragssteigerungen, was neben Wasser- auch auf pH- und Nährstoffeffekten der organischen Düngung beruhen könnte.
3. Der Einsatz von Fertigkompost fördert das Wachstum und die WUE von Spargel im Vergleich zu Pferdemit und Champost, was bei kontrollierter Wasserversorgung in Gefäßversuchen gezeigt werden konnte. Die Ursachen hierfür konnten jedoch nicht abschließend geklärt werden.
4. Der verwendete Champost führte aus verschiedenen möglichen Gründen zu Wachstumsbeeinträchtigungen und Qualitätsminderungen des Erntegutes, so dass dieser nicht für den Einsatz im Spargelanbau empfohlen werden kann.

4 Einfluss von Unterflur-Bewässerung auf den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen

Kurzfassung

Ziel der Untersuchungen war, den Einfluss von Unterflur-Tropfbewässerung in unterschiedlichen Bodentiefen auf das Wachstum und den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen zu erfassen. Dazu wurde ein einfaktorieller Gefäßversuch mit dem Versuchsfaktor ‚Applikationsort des Wassers‘ in einer Vegetationshalle unter nordwest-deutschen Klimabedingungen durchgeführt. Dabei wurden die Effekte einer Unterflur-Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe (d. h. 15 cm unterhalb des Rhizoms), was der allgemeinen Empfehlung für den Spargelanbau entspricht, und 25 cm Bodentiefe (Rhizomebene) den Effekten der Überflur-Tropfbewässerung auf das Wachstum und den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen gegenüber gestellt. Mit der differenzierten Bewässerung wurde ab Entfaltung der Phyllokladien (Mitte Mai) begonnen.

Aus den Untersuchungen ging hervor, dass der Applikationsort des Wassers (über- und unterflur) das Kronenwachstum von Spargel beeinflusst. Auf eine Wasserapplikation in 40 cm Bodentiefe reagierte der Spargel mit der Bildung relativ vieler kurzer Speicherwurzeln, deren Wachstum vermutlich während der Krautwachstumsphase eingeschränkt und anschließend nach Wiederbefeuchtung fortgesetzt wurde. Darüber hinaus wurden bei den Pflanzen mit Unterflur-Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe typische Trockenstressreaktionen des Spargels beobachtet, wie ein reduziertes Krautwachstum gegenüber den Pflanzen mit Überflur-Tropfbewässerung, hervorgerufen durch das Ausbleiben des Augusttriebes und Triebspitzenwelke, sowie eine Erhöhung des Kronen/Aufwuchs-Verhältnisses. Neben den Pflanzen mit Unterflur-Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe konnten auch diejenigen mit Unterflur-Tropfbewässerung in 25 cm Bodentiefe dem Wachstum der überflurig bewässerten Pflanzen nicht uneingeschränkt folgen. In diesem Zusammenhang besteht noch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses von Sauerstoffmangel und Trockenstress in Rhizomnähe auf das Rhizomwachstum.

4.1 Einführung

Bevor das Absterben junger Triebe, die sogenannte Triebspitzenwelke oder ‚Spazierstockkrankheit‘, und das Ausbleiben des üblicherweise Anfang August zu erwartenden zweiten Austriebs beobachtet und auf Trockenstress zurückgeführt wurde (Wuchner & Hartmann, 1975), ging Spargel in der Praxis aufgrund seines umfangreichen Wurzelsystems und seiner verwandtschaftlichen Beziehungen zu trockenresistenten Pflanzen lange Zeit der Ruf voraus, trockenresistent zu sein.

Die Quantifizierung der Anpassungsreaktionen von Spargel an Trockenstress führte letztlich zur Einstufung des Spargels in die Gruppe der moderat trocken-toleranten Pflanzen (Daningsih et al., 2004; Drost, 1999b; Wilcox, 1985; Wilcox-Lee & Drost, 1990; Wilson et al., 1996). Wilcox (1985) konnte starke Korrelationen zwischen dem jeweils um 11 Uhr gemessenen Wasserpotenzial des Bodens (Ψ_{Boden}), dem Xylem-Potenzial des Spargels (Ψ_{Xylem}) und dem Wachstum feststellen. In Untersuchungen von Drost & Wilcox-Lee (1990) wurden stomatare Leitfähigkeit und Transpirationsrate ab Ψ_{Xylem} von -0.30 MPa und die Photosyntheserate ab Ψ_{Xylem} von -0.50 MPa signifikant reduziert. Wilcox (1985) und Wilcox-Lee & Drost (1990) stellten fest, dass Spargel im Bereich nahe der Feldkapazität auf kleine Reduktionen des Ψ_{Boden} mit relativ großen Wachstumsdepressionen reagierte und empfehlen daher zur Optimierung von Stangenstärke und Ertrag eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität sicherzustellen.

Da Spargel mit seinen spezifischen Anforderungen an die maschinelle Bearbeitung überwiegend auf Sandböden mit geringer Sorptionsfähigkeit für Nährstoffe und geringer Feldkapazität angebaut wird, kann in Trockenperioden zur Sicherstellung der Wasserversorgung auf Bewässerung oft nicht verzichtet werden. In der Praxis wird überwiegend mit Beregnungsmaschinen bewässert, die zwar kostengünstig und flexibel einsetzbar sind, jedoch eine unbefriedigende Wasserverteilung, geringe Wassereffizienz und hohe Windanfälligkeit aufweisen.

Ein exakteres Bewässerungsmanagement ermöglichen Unterflur-Tropfbewässerungssysteme. Diesen wird aufgrund der geringen Applikationsverluste (geringe Wasserverluste durch Evaporation, Abfluss und Versickerung) die größte Wassernutzungseffizienz (WUE) unter den Bewässerungssystemen zugeschrieben. Als größter Vorteil von Tropfbewässerungssystemen wird die Vermeidung großer Fluktuationen im Bodenwassergehalt durch relativ kleine Was-

sergaben in hoher Frequenz gesehen, die auch kurzzeitigen Wasserstress der Pflanzen verhindern (Dasberg & Or, 1999; Bucks & Davis, 1986) und Auswaschungsverluste vermeiden. Aus der partiellen Bodenbefeuchtung ergeben sich weitere Vorteile wie die Begrenzung des Unkrautwuchses, eine gute Befahrbarkeit der Felder, eine bessere Erhaltung der Bodenstruktur und Sauerstoffversorgung der Wurzeln sowie eine höhere Flexibilität beim Pflanzenschutz (Kunzelmann & Paschold, 1998; Bucks & Davis, 1986). Da trockene Bestände die Inkubation und Entwicklung vieler Pflanzenpathogene verhindern, besteht ein Einsparungspotenzial bei Fungiziden, wie Eberhard & Maync (1999) am Beispiel von Bundmöhren feststellten. Darüber hinaus kann die Bewässerung automatisiert werden und die Nährstoffzufuhr kontinuierlich über Fertigation erfolgen.

Den Vorteilen stehen aber auch nicht unerhebliche mögliche Nachteile gegenüber. So ist der Investitions- und Installationsaufwand im Vergleich zu anderen Bewässerungssystemen relativ hoch. Um ein Verstopfen der Emitter zu vermeiden, ist eine gute Wasserqualität erforderlich. Die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung setzt voraus, dass weder Verstopfungen noch Leckstellen an den Tropferleitungen existieren, dies ist aber besonders bei unterflur verlegter Tropfbewässerung schwer kontrollierbar. Durch die partielle Bodenbefeuchtung kann auch die Aufnahme des Bodenstickstoffs reduziert sein. Für Zwischenreihenbegrünung ist ein zweites überfluriges Bewässerungssystem erforderlich.

Im Spargelanbau wird empfohlen, die Unterflur-Tropfbewässerung während des Pflanzvorganges 15 - 20 cm seitlich und 10 - 15 cm unterhalb des Rhizoms zu verlegen (Mosler, 2001). Im Feldversuch (FV) 02-04 (Kap. 3) war die Verlegung unterhalb der Rhizomebene aufgrund fehlender Vorrichtungen an der Pflanzmaschine nicht möglich, so dass die Tropfschläuche 10 cm seitlich der Rhizome installiert wurden. Kronen- und Rhizommassen waren im FV 02-04 bei einer Wasserversorgung nahe der Feldkapazität tendenziell bzw. signifikant gegenüber einer niedrigen Wasserstufe reduziert, was bei einem Vergleich mit Literaturangaben untypisch für Wassereffekte bei Spargel ist. Aus diesem Grund wurde ein Gefäßversuch durchgeführt, um folgende Hypothesen zu prüfen:

1. Der Applikationsort des Wassers (über- und unterflur) beeinflusste die Wasseraufnahme und damit das Kronen- und Rhizomwachstum von Spargel.
2. Wasserapplikation in unmittelbarer Nähe zum Rhizom beeinträchtigte dessen Wachstum und damit die Bildung neuer Speicherwurzeln.

4.2 Material & Methoden

4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Im März 2004 wurde ein einfaktorierter Gefäßversuch (GV 04) mit einjährigen Spargelpflanzen (cv. Gijnlim) in einer überdachten Vegetationshalle der zentralen Versuchsanlage des Fachbereichs Gartenbau als vollrandomisierte Anlage mit vier Wiederholungen angelegt. Der Faktor ‚Applikationsort des Wassers‘ wies die Stufen ‚Überflur‘ (Überflur-Tropfbewässerung), ‚Unterflur in 25 cm‘ und ‚Unterflur in 40 cm‘ (Unterflur-Tropfbewässerung in 25 cm (vgl. FV 02-04) bzw. in 40 cm Bodentiefe (allg. Empfehlung)) auf. Je 800 l-Gefäß (2.2 m langes Rohr, Ø 40 cm, Abb. 4.1), das bis zu einer Höhe von 1.3 m mit mittelfeinem Sand und darüber bis 5 cm unterm Rand mit humosem Oberboden befüllt war, wurde am 25. März in 20 cm Tiefe eine Spargelpflanze (ca. 140 g) gepflanzt.

Am 6. Mai wurden die Pflanzen mit jeweils 1.6 g N in Form von Ammoniumnitrat und am 4. August mit weiteren 0.5 g N als Calciumnitrat über die Bewässerung versorgt, was, bezogen auf die Gefäßoberfläche, zunächst einem N_{\min} -Sollwert von 130 kg N/ha und einer Nachdüngung von 40 kg N/ha (Schichtdicke 30 cm, Lagerungsdichte 1.4 g/cm³) entsprach. Eine P-K-Grunddüngung erfolgte zu Versuchsbeginn. Die Differenzierung der Varianten erfolgte nach Entfaltung der Phyllokladien der ersten Triebe Mitte Mai. Während der Vegetationszeit wurde eine konstante Wasserversorgung von 70 % Wasserkapazität der Durchwurzelungstiefe (WKD) angestrebt, die vom 2. - 15. August auf 80 % WKD erhöht und mit Beginn der Krautreife Anfang September auf 50 % WKD reduziert wurde. Zur Bewässerungssteuerung wurden TDR-Sonden (Soilmoisture Equipment, Santa Barbara, USA) in 10, 25, 55, 85, 115, 145 und 175 cm Bodentiefe so eingesetzt, dass sie jeweils mit dem Schaft den Gefäßrand berührten und sich die Spitze nahezu im Mittelpunkt des Gefäßquerschnittes befand. Die Wasserkapazität wurde mit Hilfe von Stechzylinderproben aus entsprechend befüllten und wassergesättigten Gefäßen mit perforiertem Boden bestimmt und betrug 22 Vol.-% im Ober- und 12.9 Vol.-% im Sand-Unterboden. Angeboten wurde jeden zweiten bis dritten Tag jeweils die Wassermenge, die ‚theoretisch‘ die Wasserdefizite zum Sollwert im durchwurzelten Horizont unterhalb des Wasserapplikationsortes ausglich, wobei für eine Bewässerung ein Mindestwasserbedarf von 0.5 l/Pfl. bestehen musste. Um Versickerung auszuschließen, wurde die Wasseraufnahme aus den einzelnen Bodenschichten auf der Basis von Was-

serdefiziten in 24 h-Zeiträumen, d. h. von 5 bzw. 6 Uhr des ersten oder zweiten Tages nach einer Bewässerung bis zur gleichen Zeit des darauffolgenden Tages, ermittelt. Dabei wurden die Bodenschichten so definiert, dass die TDR-Sonden jeweils auf deren mittlerer Höhe lagen, wobei die ‚Unterflur in 25 cm‘-Variante eine Ausnahme bildete. Hier wurde berücksichtigt, dass sich der Wassergehalt oberhalb der Sonde von dem unterhalb unterscheidet, entsprechend grenzte bei 25 cm Bodentiefe die erste an die zweite Bodenschicht. Die Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes im ersten Standjahr wurde nach Empfehlungen der FAO (Smith, 2006) nach modifizierter PENMAN-Formel und den entsprechenden Pflanzenkoeffizienten (Paschold, 1999) berechnet.

4.2.2 Versuchsauswertung

Pflanzenwuchs und -massen

Die Erfassung von Wurzelverteilung und Durchwurzelungstiefe erfolgte ab Juni wöchentlich zerstörungsfrei mit Wurzelbeobachtungsröhren aus Plexiglas (\varnothing 3.8 cm, 418 cm²), in die ein Endoskop, das über ein Lichtleitkabel mit einem Lichtprojektor verbunden war (Richard Wolf GmbH, Knittlingen), hineingeführt wurde. Aus den ab Ende Mai wöchentlich erfassten Messdaten des oberirdischen Aufwuchses wurde nach der Formel zur Berechnung des Kegelvolumens wie folgt der Wuchsleistungsfaktor (Hartmann, 1989) als Maßstab für das oberirdisch entwickelte Pflanzenvolumen berechnet:

$$\text{Wuchsleistungsfaktor (cm}^3\text{)} = 1/3 * \pi * (\bar{x} \text{ Triebradius})^2 * \bar{x} \text{ Trieblänge} * \text{Triebanzahl}$$

Die Endauswertung erfolgte am 22. November 2004, wobei Frisch- und Trockenmasse, sowie Nährstoffgehalte des Aufwuchses (oberirdischer Aufwuchs + unterirdische Strünke) und der Kronen sowie die Längen der Speicherwurzeln bestimmt wurden. Die Kronen wurden vor der Massenerfassung gewaschen.

Zur Berechnung der WUE wurde der TM-Zuwachs dem Wasserverbrauch während der Krautwachstumsphase gegenübergestellt.

Nährstoffgehalte in Pflanze und Boden

Neben den auf ihre Nährstoffgehalte untersuchten Pflanzenteilen wurden am Endauswertungstermin auch die Kohlenhydratgehalte der Speicherwurzeln in Anlehnung an das Entscheidungsunterstützungssystem *AspireNZ* (Wilson et al., 2002) erfasst. Dazu wurde je Pflanze eine Mischprobe der im Versuchsjahr neu

gebildeten zimtbraunen Speicherwurzeln mit einer Gesamtlänge von 15 - 20 cm gewaschen, eingefroren, zerkleinert und anschließend der Kohlenhydratgehalt mit einem Refraktometer (Krüss Optronic GmbH, Hamburg) in % Brix im zentrifugierten Presssaft bestimmt. Die Nährstoffgehalte im Boden wurden zu Versuchsbeginn und -ende bestimmt, wobei zu Versuchsende auch die Nährstoffverteilung im Bodenhorizont erfasst wurde. Die Methoden zur Bestimmung der Nährstoffgehalte sind in Kapitel 3.2.2 detailliert beschrieben.

Wasserpotenzial (Ψ_{xylem}) und Photosynthesekapazität (A_{sat})

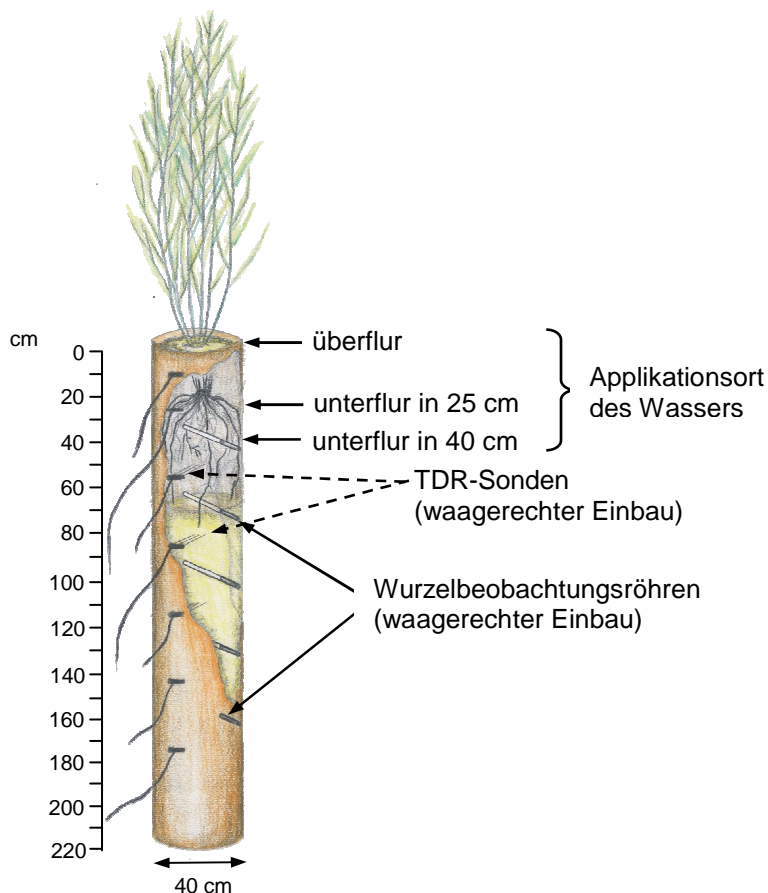
Das Xylem-Wasserpotenzial von Spargel (Ψ_{xylem}) wurde mit einer Scholander-Bombe (Soilmoisture Equipment, Santa Barbara, USA) am 11., 12., 17. und 18. August jeweils um 6, 11 und 16 Uhr gemessen. Am 11. und 18. August wurde nach der ersten Messung bewässert, woraufhin der Bodenwassergehalt bis zur letzten Messung des Folgetages kontinuierlich absank. Je eine Messreihe wurde bei den Wasserstufen 80 % WKD (11.-12.08.) und 70 % WKD (17.-18.08.) vorgenommen. Durchgeführt wurden die Messungen an jeweils zwei relativ jungen Seitentrieben mit vollentfalteten Phyllokladien. Vor der Auswertung wurden beide Messwerte einer Pflanze zu einem Mittelwert zusammengefasst. Die Photosynthesekapazität (A_{sat}), die stomatare Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_s) und die Transpirationsrate (E) wurden am 12. August zwischen 13.30 und 15 Uhr sowie am 19. August zwischen 10 und 11.30 Uhr mit einem portablen Photosynthese-Messgerät (Li-Cor Model 6400, Lincoln, USA), das mit einem CO_2 -Modul ausgestattet war, gemessen. Entsprechend der Ψ_{xylem} -Messreihen wurden die Messungen bei unterschiedlichen Wasserstufen, aber an Seitentrieben aller Triebe mit vollentfalteten Phyllokladien unter den in Tab. 4.1 aufgelisteten Bedingungen durchgeführt. Je Messung wurde ein Büschel bestehend aus ca. 5 - 8 Phyllokladien bis zur Stabilisierung des Photosynthesemesswertes nach ca. 1 Minute in der Küvette des Messgerätes eingeschlossen, anschließend abgetrennt und Länge, Durchmesser, Frisch- und Trockenmasse aller verwendeten Phyllokladien bestimmt und aus dem Verhältnis der Phyllokladienmasse zur -fläche das spezifische Phyllokladiengewicht errechnet. Da die Phyllokladien des Spargels zylindrisch aufgebaut und die Stomata unregelmäßig verteilt sind, wurde bei der Berechnung der Blattfläche die Mantelfläche der Phyllokladien (= Phyllokladiendurchmesser * -länge * π) zugrunde gelegt.

Tab. 4.1: Bedingungen für Photosynthese-Messreihen

		12.08.04	19.08.04
Bewässerungsstufe		85 % WKD	70 % WKD
Lichtquelle		6400-02B, rotblau	
PAR	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	500	
CO ₂ -Konzentration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1}$	600	800
Temperatur (Blatt, Küvette)	°C	25 - 27	20 - 23
Durchflussrate	$\mu\text{mol s}^{-1}$	300	250

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm SAS[®] 8e (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) vorgenommen. Die erhobenen Daten wurden zunächst mit der SAS-Prozedur PROC GLM varianzanalytisch getestet und anschließend einem Mittelwertsvergleich nach Tukey-Kramer für unbalancierte Daten unterzogen, wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % galt. Regressionen und Abbildungen wurden mit SigmaPlot 8.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) erstellt.

**Abb. 4.1:** Versuchsaufbau von GV 04

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Wasserangebot und -aufnahme

Die Steuerung der Bewässerung über Bodenwassergehalt und Durchwurzelungstiefe führte zu Beginn der differenzierten Bewässerung im Mai/Juni zu einem relativ geringen Wasserangebot im Vergleich zur Referenz-Evapotranspiration eines Spargelbestandes im ersten Standjahr (Abb. 4.2a). Die Erweiterung der für die Bewässerung relevanten Durchwurzelungstiefe und die temporäre Erhöhung des Soll-Wassergehaltes von 70 auf 80 Vol.-% WKD im August führten zu einem vergleichbaren Verlauf des Wasserangebotes der Varianten und der Referenz-ET eines Spargelbestandes.

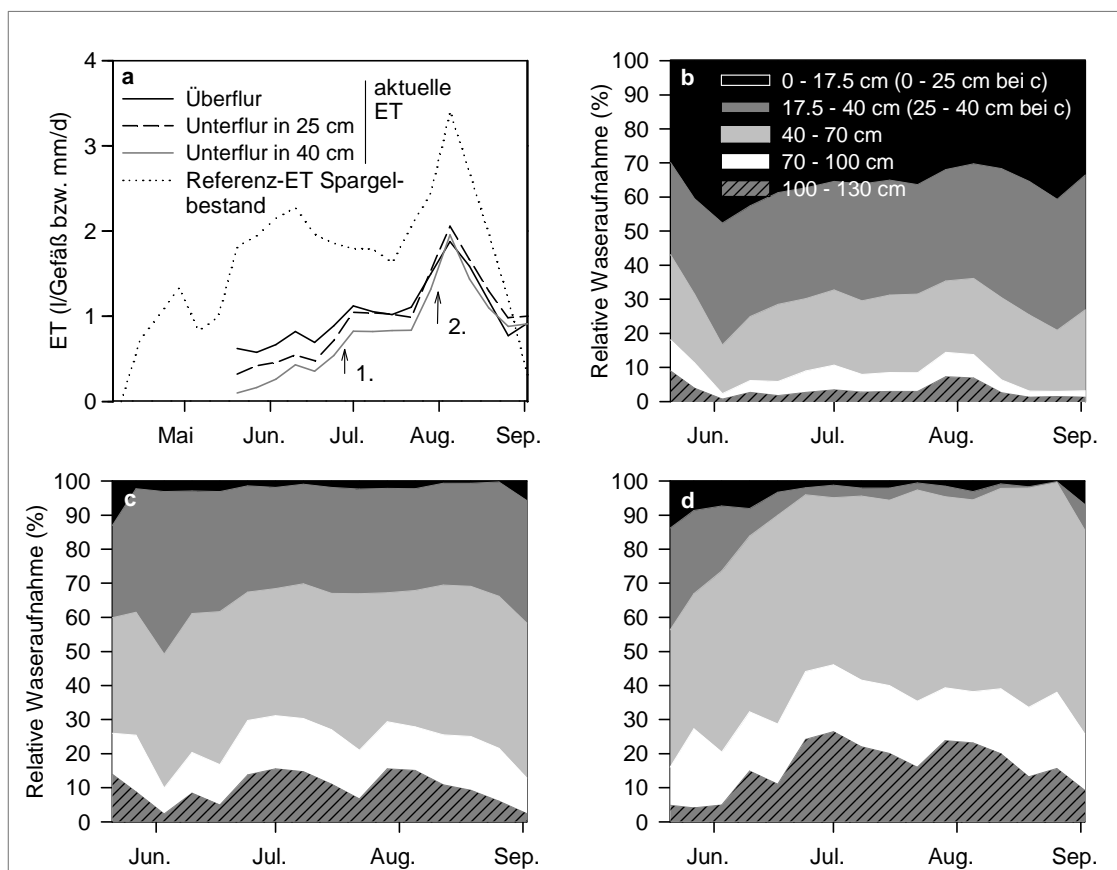


Abb. 4.2: Aktuelle Evapotranspiration (ET) des Spargels im GV 04 (l/Gefäß) bei drei Applikationstiefen und Referenz-ET eines Spargelbestandes (mm/d) im 1. Standjahr; (1. Pfeil: Erweiterung der für die Bewässerung relevanten Durchwurzelungstiefe auf 70 cm, 2. Pfeil: Anpassung der Bewässerung an Durchwurzelungstiefe von 100 cm, Erhöhung der Wasserversorgung auf 80 % WKD) (a) sowie Wasseraufnahme des Spargels aus verschiedenen Bodenschichten bei Überflur- (b) und Unterflur-Tropfbewässerung in 25 (c) und 40 cm (d) Bodentiefe während der Vegetationsperiode im GV 04 (a - d jeweils Wochenmittel, b - d gestapelte Kurven)

Die Wasseraufnahme des Spargels nahm bei Überflur-Bewässerung mit zunehmender Bodentiefe ab (Abb. 4.2b). Bei Unterflur-Bewässerung wurde das Wasser schwerpunktmäßig im Bereich unterhalb des Applikationsortes bis 70 cm Bodentiefe aufgenommen (Abb. 4.2c,d). Aus dem darunterliegenden Sand wurde kaum Wasser aufgenommen, wobei der Anteil an der Wasseraufnahme mit tiefer liegendem Applikationsort des Wassers zunahm. Bei den Unterflur-Varianten trocknete der Boden oberhalb der Applikationsorte des Wassers ab Beginn der differenzierten Bewässerung langsam aus. Dabei sank der Wassergehalt in Rhizomnähe bei der ‚Unterflur in 40 cm-Variante‘ von Mitte Juli bis Anfang September von ca. 6 auf 4 Vol.-% ab. 10 cm unterhalb der Bodenoberfläche wurden bei den Unterflur-Varianten ähnliche Werte gemessen.

4.3.2 Produktivität des Wassereinsatzes

Zwischen der Faserwurzelichte in 40, 70 und 100 cm Bodentiefe und der Wasseraufnahme des Spargels in den entsprechenden Bereichen (beides in % des Gesamtbereiches) bestand für die Unterflur-Varianten eine enge positive Korrelation (Abb. 4.3a). Die höchsten Konzentrationen an Faser- und Speicherwurzeln, die eng miteinander korrelierten (Abb. 4.3b), traten jeweils in Rhizomnähe bei verstärkt horizontalem Wachstum der Speicherwurzeln auf und nahmen mit zunehmender Bodentiefe deutlich ab (Abb. 4.3c,d). Eine im Vergleich zu den Unterflur-Varianten hohe Faserwurzelichte der Überflur-Variante oberhalb des Rhizoms, die maßgeblich an der Wasseraufnahme beteiligt war, konnte bei der Endauswertung nachgewiesen werden. Der relativ geringen Bedeutung der tieferen Bodenschichten für die Wasserversorgung der Überflur-Variante entsprechend, konnte zum Endauswertungstermin auch eine signifikant reduzierte Faserwurzelichte in 100 cm Bodentiefe verzeichnet werden, wobei diese sonst keine Unterschiede zwischen den Varianten aufwies.

Während die Längendichte der Speicherwurzeln sowie Kronen- und Rhizommassen nicht vom Applikationsort des Wassers beeinflusst wurden (Tab. 4.2), führte unterflurige Wasserapplikation in 40 cm Bodentiefe gegenüber den anderen Varianten tendenziell zu einer Erhöhung der Speicherwurzelanzahl, deren mittlere Länge gegenüber den anderen Varianten jedoch deutlich reduziert war. Dies war auf einen signifikant höheren Anteil kurzer Speicherwurzeln mit bis zu 30 cm Länge zurückzuführen.

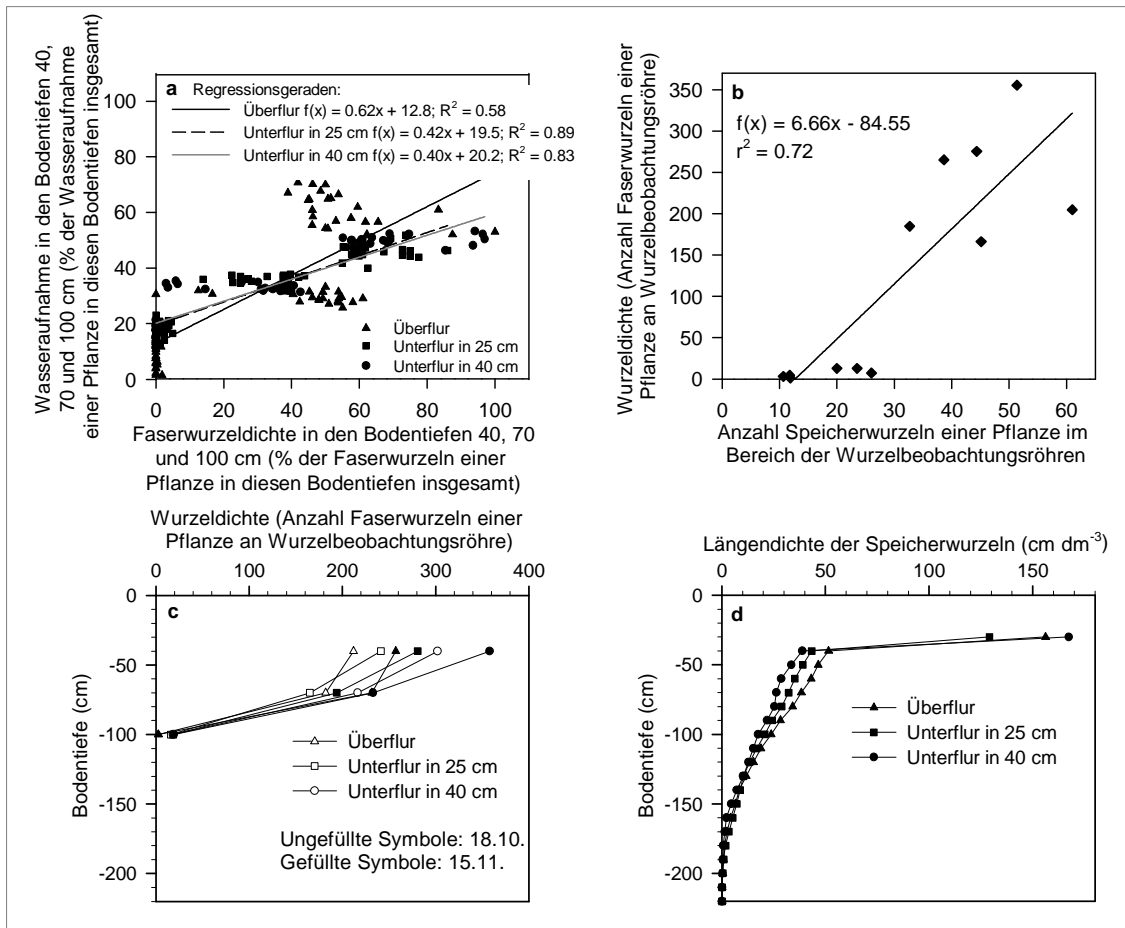


Abb. 4.3: Beziehungen zwischen Faserwurzel-dichte und Wasseraufnahme der Spargelpflanzen (a) sowie Anzahl Speicherwurzeln und Faserwurzel-dichte (Mittelwerte der Varianten) (b) im Bereich der Wurzelbeobachtungsröhren (40, 70 und 100 cm Bodentiefe), Wurzel-dichte im Bodenhorizont am 18. Okt. und 15. Nov. (c), Verteilung der Längendichte der Speicherwurzeln bei Endauswertung (d)

Neben dem Wurzelwachstum zeigte der Applikationsort des Wassers auch Einflüsse auf das Wachstum des Photosyntheseapparates. Der Wachstumsleistungsfaktor nahm zunächst bis Juli exponentiell zu und stagnierte anschließend (Abb. 4.4a). Ab August setzte ein neuer großer Wachstumsschub in allen Varianten ein, der vermutlich durch die erneute Mineral-N-Düngung angeregt wurde und für die Varianten unterschiedlich stark ausfiel. Das Wachstum der ‚Unterflur in 40 cm-Variante‘ stagnierte schon bald und blieb bis zum Ende der Vegetationszeit hinter dem Wachstum der Überflur-Variante zurück, unterschied sich aber nicht signifikant von der ‚Unterflur in 25 cm‘-Variante. Aus der Korrelation zwischen den Wachstumsleistungsfaktoren des gesamten Triebvolumens (inklusive je 20 cm Länge für unterirdische Strünke) und den Aufwuchs-Trockenmassen bei der Endauswertung (Abb. 4.4b) wurde die TM-Produktion des Aufwuchses

während der Vegetationszeit ermittelt. Triebanzahl, -durchmesser und -längen (kumuliert) pro Pflanze wurden einzeln betrachtet im Laufe der Vegetationszeit nicht signifikant vom Versuchsfaktor beeinflusst (Tab. 4.2).

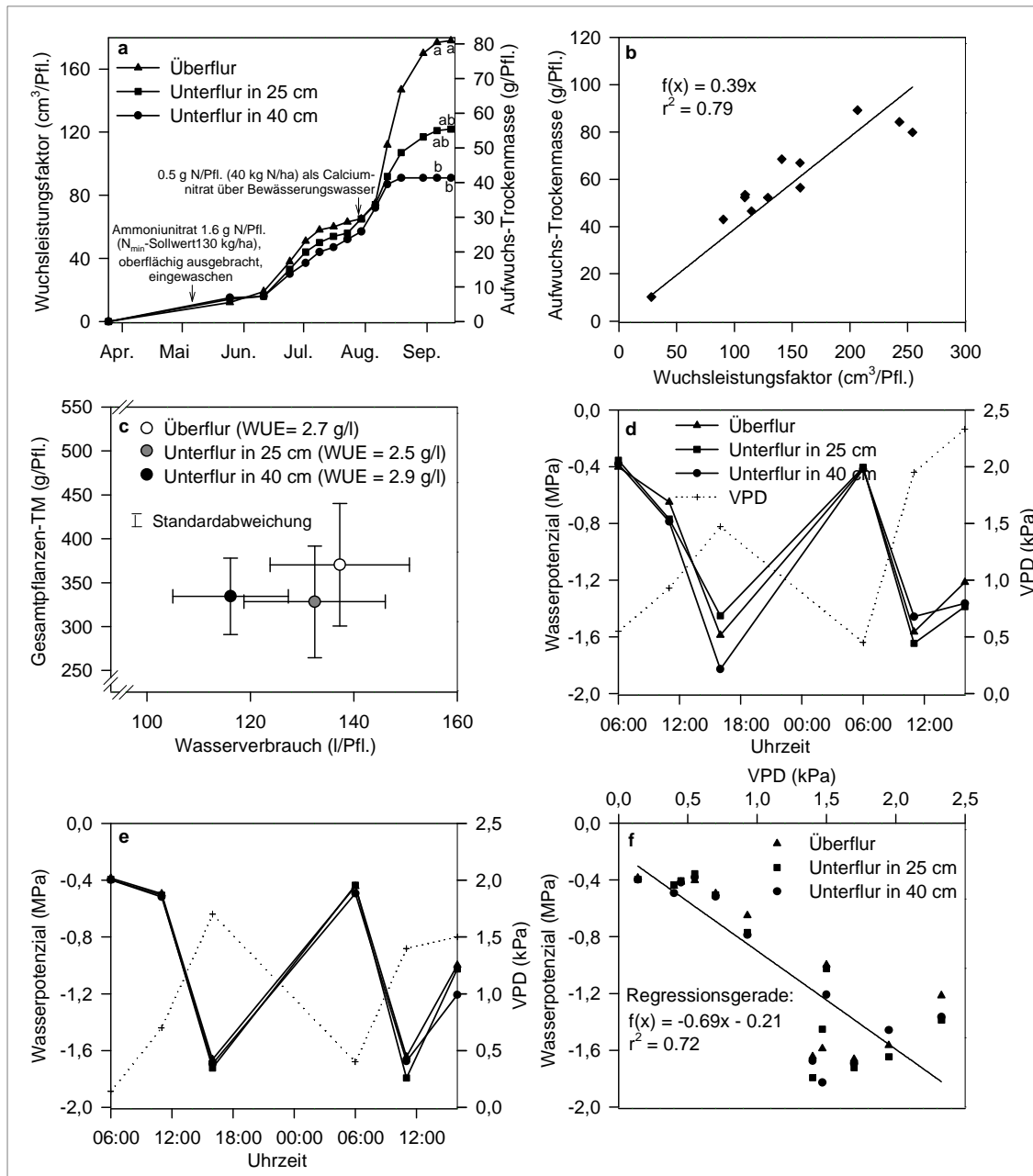


Abb. 4.4: Wuchsleistungsfaktor (WLF) und TM-Entwicklung des Aufwuchses während der Vegetationszeit (a), Beziehung zwischen WLF und Aufwuchs-TM bei Endauswertung (b), Wassernutzungseffizienz (WUE) (c), Verlauf des Wasserpotenzials der Pflanzen (Ψ_{Xylem}) und Sättigungsdefizits der Luft (VPD) am 11.-12.08. (d) und 18.-19.08.04 (e), sowie Beziehung zwischen VPD und Ψ_{Xylem} im GV 04 (f), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

Ein Absterben junger Triebe wurde in beiden Unterflur-Varianten beobachtet und trat auffallend beim zweiten Wachstumsschub der ‚Unterflur in 40 cm-Variante‘ hervor. Bei dieser kam es zu einem Pflanzenausfall durch oberirdisches Absterben ab Anfang Juli, dessen Ursache nicht eindeutig geklärt werden konnte. Diese Wiederholung wurde daher von den Auswertungen ausgeschlossen. Die Beeinträchtigung des Krautwachstums durch Unterflur-Bewässerung in 40 cm Bodentiefe äußerte sich am Endauswertungstermin in einer reduzierten mittleren Trieblänge und Aufwuchs-Trockenmasse gegenüber der Überflur-Variante. Das Kronen/Aufwuchs-Verhältnis der ‚Unterflur in 40 cm-Variante‘ war mit 6.5 signifikant höher als bei der Überflur-Variante mit 4.4. Die ‚Unterflur in 25 cm-Variante‘ unterschied sich im Krautwachstum nicht von den anderen. Die Kohlenhydratreserven der Speicherwurzeln lagen im Mittel bei 146 g CH₂O/Pfl. (Tab. 4.2) und wurden trotz unterschiedlich großer Photosyntheseapparate ebenso wie die Gesamtpflanzenmassen nicht vom Versuchsfaktor beeinflusst. Der Applikationsort des Wassers und die damit verbundene unterschiedlich starke Wasseraufnahme aus einzelnen Bodenschichten sowie morphologische Veränderung der Spargelpflanze hatte weder einen signifikanten Einfluss auf den Wasserverbrauch noch auf die WUE des Spargels (Abb. 4.4c).

Tab. 4.2: Pflanzenparameter des Spargels im GV 04 bei Endauswertung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Kumulierte Trieblänge (oberirdisch) cm/Pfl.	mittl. Trieb- länge cm	Auf- wuchs	Krone	Faser- wur- zeln	Speicher- wurzeln		mittl. Wurzel- länge cm	CH ₂ O- Reser- ven g/Pfl.
						g TM/Pfl.	Anzahl/Pfl.		
Überflur	950.0	140.9 a	76.4 a	328.4	66.1	240.2	82.0	75.8 a	158.7
Unterflur 25 cm	594.0	118.9 ab	59.6 ab	304.6	65.7	219.1	67.8	77.8 a	134.0
Unterflur 40 cm	568.3	98.0 b	49.6 b	319.5	60.0	235.6	99.0	52.7 b	144.4

4.3.3 Wasserhaushalt der Spargelpflanzen

Signifikante Einflüsse des durch den Applikationsort des Wassers hervorgerufenen unterschiedlichen Wasseraufnahmeverhaltens der Spargelpflanzen auf die wasserabhängigen physiologischen Größen A_{sat} , E , g_s , Ψ_{Xylem} und dem spezifischen Phyllokladiengewicht (SLW) waren nicht festzustellen (Abb. 4.4d,e; Tab. 4.3). Insgesamt waren die Messwerte mit einer großen Streuung behaftet, was einerseits auf die Heterogenität der Pflanzen und andererseits auf Messun-

genauigkeiten bei der Bestimmung der Phyllokladienoberflächen zurückgeführt werden kann. Sehr kleine Ungenauigkeiten haben dabei eine große Wirkung. Positive Korrelationen zwischen A_{sat} und g_s kamen nur am zweiten Messtermin zum Ausdruck. E und g_s nahmen tendenziell mit tiefer gelegenem Applikationsort des Wassers ab. Zwischen dem Sättigungsdefizit der Luft (VPD) und Ψ_{Xylem} bestand eine starke negative Korrelation (Abb. 4.4d,e,f). Abweichungen ergaben sich jeweils zum Ende der Messreihen, wobei Ψ_{Xylem} zurückging während VPD weiter anstieg, was auf einen deutlichen Rückgang der Globalstrahlung (Eintrübung) bei anhaltender Temperatur und Luftfeuchte zurückzuführen war. Das K/Ca-Verhältnis, welches in der Regel mit zunehmendem Wassermangel ansteigt, wurde bei der Endauswertung für Aufwuchs, Krone und Gesamtpflanze bestimmt und ergab keine nachweisbaren Unterschiede zwischen den Varianten, obwohl bei den Nährstoffen einzeln betrachtet Unterschiede bestanden (Tab. 4.4). Da die N-Gehalte (% in TM) und die insgesamt in der Pflanzenmasse gebundene N-Menge (g N/Pfl.) keine Unterschiede zwischen den Varianten aufwiesen, kann von einer einheitlichen N-Verfügbarkeit der Varianten ausgegangen werden. Die durchschnittliche Akkumulation lag bei 3.2 g N/Pfl. und 8.4 g K/Pfl. Im Mittel lagen die Nährstoffverhältnisse für N:P:K:Mg:Ca in der Krone bei 1:0.3:2.5:0.1:0.4.

Tab. 4.3: Photosynthesekapazität und Transpirationsrate sowie stomatäre Leitfähigkeit und spezifisches Blattgewicht im GV 04 am 12. und 19. August 04, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)

	Photosynthesekapazität (A_{sat}) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Transpirationsrate (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Stomatäre Leitfähigkeit (g_s) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Spez. Phyllokladiengewicht (SLW) (mg cm^{-2})
	12.8.	19.8.	12.8.	19.8.	12.8.	19.8.	
Überflur	10.8	11.7	0.58	0.67	18.3	30.1	3.0
Unterflur 25 cm	16.0	11.3	0.51	0.55	15.7	23.6	3.1
Unterflur 40 cm	14.1	9.6	0.25	0.39	7.0	15.8	3.0

Tab. 4.4: Nährstoffgehalte der Pflanzen (% in TM) im GV 04 bei Endauswertung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Aufwuchs			Speicherwurzeln			Faserwurzeln		
	N	K	Ca	N	K	Ca	N	K	Ca
Überflur	0.54	1.94 ab	1.09 b	0.74	2.00	0.23 a	1.29	3.40	0.73
Unterflur 25 cm	0.64	2.33 a	1.35 ab	0.75	1.97	0.23 a	1.13	3.49	0.74
Unterflur 40 cm	0.64	1.56 b	1.66 a	0.83	1.92	0.21 b	1.22	3.86	0.73

4.4 Diskussion

4.4.1 Einfluss von Unterflur-Bewässerung auf das Wachstum einjähriger Spargelpflanzen

Die Methode, das Wasserangebot der Spargelpflanzen über den Bodenwassergehalt und die über Wurzelbeobachtungsröhren zerstörungsfrei erfasste Durchwurzelungstiefe zu steuern, führte insgesamt zu einem nicht signifikant unterschiedlichen Wasserangebot der Varianten während der Vegetationszeit. Dieses Wasserangebot wurde bedingt durch die unterschiedlichen Applikationsorte in unterschiedlichen Bodentiefen von den Pflanzen aufgenommen, wobei sich der Schwerpunkt der Wasseraufnahme mit zunehmender Bodentiefe des Applikationsortes des Wassers in tiefere Bodenschichten verlagerte. Die Untersuchungsergebnisse zur Wurzelverteilung von Drost (1999a), der den größten Anteil der Speicherwurzeln in 20 - 30 cm unterhalb des Rhizoms fand, zeigten sich auch im vorliegenden Versuch.

Die These, dass der Applikationsort des Wassers (über- und unterflur) die Wasseraufnahme und damit das Kronenwachstum von Spargel beeinflusste, konnte bestätigt werden. Als auffällige morphologische Adaption an eine Wasserapplikation in 40 cm Bodentiefe reagierte der Spargel mit der Bildung relativ vieler kurzer Speicherwurzeln mit einer Länge < 30 cm. Um diese Reaktion zu erklären, können nur Vermutungen angestellt werden. Da Staunässe ausgeschlossen werden kann, erscheint es am naheliegendsten, dass das Wachstum angelegter Speicherwurzeln zunächst während der Krautwachstumsphase durch Trockenstress in Rhizomnähe eingeschränkt wurde. Drost & Wilcox-Lee (1997) sowie Drost (1999a) beobachteten in ihren Untersuchungen einen Rückgang der Speicher- und Faserwurzelanzahl als Folge von Trockenstress.

Ab der zweiten Septemberwoche, d. h. nach Beendigung der Krautwachstumsphase, wurden alle Varianten wieder überflurig bewässert, um den natürlichen Bedingungen im Feld Rechnung zu tragen. Der Trockenstress in Rhizomnähe der Variante mit Unterflur-Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe wurde somit aufgehoben. Da das Wurzelwachstum bis zum Eintreten der Ruheperiode anhält (Krug et al., 1993), standen den Pflanzen noch etwa zehn Wochen bis zum Endauswertungstermin zur Verfügung, um das Wachstum neuer Speicherwurzeln zu fördern. Diese Vermutung würde das von Drost & Wilcox-Lee (1997a,b) und Wilson et al. (1996) beschriebene große Kompensationsvermögen des

Spargels untermauern, wonach Spargel in der Lage ist, Wachstumsdefizite, die während einer Vegetationszeit entstanden sind, ausreichend zu kompensieren, so dass Wasserdefizite nicht zwangsläufig zu Langzeiteffekten führen. In diesem Fall könnten so durch Trockenstress hervorgerufene Beeinträchtigungen der Trockenmassebildung von Krone, Speicher- und Faserwurzeln, wie in Untersuchungen von Drost (1996), Drost & Wilcox-Lee (1990, 1997), Wilcox (1985) sowie Wilcox-Lee & Drost (1990) beobachtet, nachträglich ausgeglichen worden sein. Demnach müsste von einer deutlich geringeren WUE der unterflurig in 40 cm Bodentiefe bewässerten Pflanzen während der differenzierten Bewässerung ausgegangen werden, was entweder Sickerwasserverluste und/oder einen Photosyntheseapparat mit geringer Photosynthesekapazität impliziert. Die mit TDR-Sonden kontinuierlich dokumentierte Wasserbewegung im Bodenhorizont ergab keine eindeutigen Hinweise auf Sickerwasserbildung, wobei der Wassergehalt in 145 und 175 cm Bodentiefe nur regelmäßig gemessen und nicht wie in den anderen Bodenschichten kontinuierlich aufgezeichnet wurde. Die Nettphotosynthesekapazität erreicht bei Spargel in gerade voll entfaltenen Phyllokladien ihr Maximum und nimmt mit fortschreitender Vegetationszeit und Alterung der Phyllokladien ab (Guo et al., 2002c). Dabei vermuten Guo et al. (2002c), dass die Alterung der Phyllokladien in zwei Phasen verläuft. In der ersten Phase könne die Abnahme der Photosyntheserate mit einer Zunahme des Mesophyllwiderstandes durch biochemische Inaktivierung der Photosynthese-Enzyme oder einer Abnahme des Enzym-pools durch Kälteeinbruch erklärt werden. In der zweiten Phase gibt es eine insgesamt Reduktion der Reaktionszentren und der Lichternteantennenkomplexe des Photosystem II. Bei den Pflanzen mit Unterflur-Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe konnte eine reduzierte Krautproduktion, die im wesentlichen auf das Ausbleiben des Augusttriebes und Triebspitzenwelke zurückzuführen war, beobachtet werden. Dies gilt insgesamt ebenso wie die Erhöhung des Kronen/Aufwuchs-Verhältnisses als typische Trockenstressreaktion des Spargels (Cannell & Takatori, 1970; Drost, 1996; Drost & Wilcox-Lee, 1990, 1997; Wilcox, 1985; Wilcox-Lee & Drost, 1990). Eine geringere Nettphotosynthesekapazität der im Vergleich zu den anderen Varianten relativ älteren und möglicherweise durch Wassermangel gestressten Phyllokladien, was auch zu geringerer Photosynthesekapazität führt (Drost & Wilcox-Lee, 1990; Wilcox-Lee & Drost, 1990), der unterflurig in 40 cm Boden-

tiefe bewässerten Pflanzen konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, g_s , E und A_{sat} waren bei der Variante aber tendenziell am niedrigsten. Die ermittelten Werte der physiologischen Größen waren mit Literaturwerten für ungestresste Pflanzen vergleichbar (Faville et al., 1999; Guo et al., 2002; Hills, 1986; Wilcox-Lee & Drost, 1990; Woolley et al., 1996; Drost & Wilcox-Lee, 1990). Das SLW der Phyllokladien war im Mittel größer als bei Guo et al. (2002).

Die Kohlenhydratreserven sind vom Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln und der Gesamtwurzelmasse abhängig (Woolley et al., 1999; Guo et al., 2002a). Sie stellen das Ergebnis der Assimilatproduktion und -verlagerung des Aufwuchses dar und bestimmen das Ertragspotenzial des Spargels (Benson & Takatori, 1980; Downton & Törökfalvy, 1975; Guo et al., 2001). In Untersuchungen von Drost & Wilcox-Lee (1997a) wurden die Kohlenhydratreserven infolge Trockenstresses reduziert. In den vorliegenden Untersuchungen konnte auch trotz des signifikant reduzierten Photosyntheseapparates der Variante mit Wasserapplikation in 40 cm Bodentiefe kein Einfluss der Behandlungen auf die Kohlenhydratreserven nachgewiesen werden. Somit wird das von Drost & Wilcox-Lee (1997a,b) und Wilson et al. (1996) beschriebene große Kompensationsvermögen des Spargels bestätigt, wonach Wachstumsdefizite, die während einer Vegetationszeit entstanden sind, nicht zwangsläufig zu Langzeiteffekten führen bzw. den Ertrag des nächsten Jahres beeinflussen müssen.

Bei Unterflur-Tropfbewässerung in 25 cm Bodentiefe stand den Pflanzen Wasser in Rhizomnähe zur Verfügung. Aber auch diese Variante konnte dem Wachstum der überflur bewässerten Pflanzen nicht uneingeschränkt folgen, wies aber nur tendenzielle Wachstumsbeeinträchtigungen auf. Sauerstoffmangel direkt am Rhizom könnte in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen. Untersuchungen dazu wurden allerdings nicht vorgenommen. Es ist allgemein bekannt, dass Spargel auf Sauerstoffmangel im Wurzelraum empfindlich reagiert und daher auch vorwiegend auf leichten Böden mit gutem Lufthaushalt angebaut wird. Diese Ergebnisse reichen insgesamt nicht aus, um die aufgestellte These, Wassermangel in unmittelbarer Nähe zum Rhizom beeinträchtigte dessen Wachstum und die Bildung neuer Speicherwurzeln, zu bestätigen.

Die Nährstoffverhältnisse ergaben ebenso wie die -reserven (g/Pfl.) der Spargelpflanzen keinen Hinweis auf Nährstoffmangel bei einer Variante (Hartmann,

1994). Der N_{\min} -Rest war mit 27 kg N/ha bezogen auf Gefäßoberfläche und -tiefe ebenso wie die Verlagerung der Nährstoffe als gering einzustufen.

4.4.2 Validität der ermittelten Effekte

Inhomogenität der Spargelpflanzen

Spargelpflanzen zeichnen sich durch eine große Inhomogenität aus (Sinton & Wilson, 1999). Aldenhoff (2005) empfiehlt daher, Untersuchungen in Gefäßversuchen mit zehn Spargelpflanzen pro Variante vorzunehmen. Der kostenintensive Versuchsaufbau ließ dies in den vorliegenden Untersuchungen aber nicht zu, so dass die Untersuchungen nur mit einem relativ geringen Versuchsumfang von vier Wiederholungen durchgeführt werden konnten. Die Heterogenität des Spargels sollte dabei durch die Auswahl gleich schwerer Jungpflanzen (140 g) reduziert werden, so dass der Versuchsumfang insgesamt als groß genug betrachtet wurde, um Interpretationen über den Einfluss der Unterflur-Bewässerung auf das Spargelwachstum zuzulassen. Es stellte sich aber heraus, dass die Heterogenität des Spargels zu groß bzw. die Anzahl der Wiederholungen zu gering war, um zuverlässige Werte für die physiologischen Größen g_s , E , A_{sat} und Ψ_{Xylem} zu erhalten. Darüber hinaus wären Unterschiede im Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln zwischen den Varianten zu erwarten gewesen, die aber nicht nachgewiesen werden konnten. Wilson et al. (2002), die sich eingehend mit dem Kohlenhydrathaushalt von Spargel beschäftigt haben, stellten fest, dass aufgrund der beträchtlichen Variation der Kohlenhydratgehalte zwischen Spargelpflanzen eines Bestandes mindestens 20 Wurzelproben genommen werden müssen, um zuverlässige Schätzungen des mittleren CH_2O -Gehaltes zu erhalten.

Methodenbegrenzungen

In den vorliegenden Untersuchungen stand der Einfluss des Applikationsortes des Wassers auf die Wasseraufnahme der Spargelpflanzen aus unterschiedlichen Bodenschichten und dessen Wirkung auf das Wachstum im Mittelpunkt. Entsprechend wurden Gefäße ausgewählt, die eine uneingeschränkte Durchwurzelungstiefe des Spargels zuließen. Da für ein uneingeschränktes Wurzelwachstum insgesamt sehr große Gefäße hätten verwendet werden müssen, wurde dabei eine Begrenzung des horizontalen Wurzelwachstums in Kauf ge-

nommen. Alle Speicherwurzeln wurden somit zu Tiefenwachstum forciert. Da diese Bedingungen für alle Pflanzen gleich waren, ist anzunehmen, dass die Versuchsfrage davon nicht beeinflusst wurde.

Bei der zerstörungsfreien Erfassung der Durchwurzelungstiefe mit Hilfe von Wurzelbeobachtungsröhren ist zu berücksichtigen, dass mit den Wurzelbeobachtungsröhren jeweils nur ein kleiner Ausschnitt aus der Bodensäule betrachtet werden konnte. Die Durchwurzelungstiefe konnte somit an den einzelnen Terminen durchaus schon weiter fortgeschritten gewesen sein. Für eine Abschätzung der Durchwurzelungstiefe und Faserwurzel-dichte stellte sich diese Methode aber insgesamt als geeignet heraus, insbesondere da sie zerstörungsfrei anwendbar ist.

Insgesamt wären weitere Wiederholungen für Zwischenauswertungen erforderlich gewesen, um offene Fragen vor allem bezüglich des Wurzelwachstums der Spargelpflanzen mit Tropfbewässerung in 40 cm Bodentiefe zu klären, aber auch um eine durch Wassermangel bedingte Ca-Unterversorgung der Triebe vom K/Ca-Verhältnis ableiten zu können (Wuchner & Hartmann, 1975) und Einflüsse der Größe des Photosyntheseapparates auf den Kohlenhydratgehalt der Speicherwurzeln während der Vegetationszeit zu erfassen. Diese hätten auch für weitere destruktive Untersuchungen wie g_s , E , A_{sat} und Ψ_{xylem} genutzt werden können, um zuverlässigere Werte zu erhalten.

Offen bleibt auch, wie sich eine spätere Differenzierung der Varianten und längerandauernde Überflur-Bewässerung aller Pflanzen auf das Wachstum insbesondere der ‚Unterflur in 40 cm‘-Variante ausgewirkt hätte. Da neugebildete Faser- und Speicherwurzeln bereits Mitte Mai, als mit der Differenzierung der unterschiedlichen Bewässerung begonnen wurde, in 40 cm Bodentiefe nachweisbar waren, ist aber anzunehmen, dass ähnliche Effekte aufgetreten wären.

4.5 Schlussfolgerungen

Insgesamt konnten aufgrund der allgemeinen Inhomogenität des Spargels und des geringen Versuchsumfanges mit den durchgeführten Untersuchungen nicht alle Effekte erklärt werden. Weitere Untersuchungen vor allem zum Einfluss von Sauerstoffmangel und Trockenstress in Rhizomnähe auf das Wachstum von Spargel scheinen notwendig. Dennoch können folgende Schlüsse aus den Untersuchungen zum Einfluss von Unterflur-Tropfbewässerung auf den Wasserhaushalt einjähriger Spargelpflanzen gezogen werden:

1. Je weiter die Wasserzufuhr in tiefere Bodenschichten verlagert wird, desto mehr verlagert sich auch der Wasseraufnahmeschwerpunkt des Spargels.
2. Die Sicherstellung der Wasserversorgung von Spargel im ersten Standjahr über Tropfschläuche in 40 cm Bodentiefe, d. h. 15 cm unterhalb des Rhizoms (allgemeine Empfehlung), ruft bei Spargel vermutlich Trockenstressreaktionen hervor, wenn ab Entfaltung der Phyllokladien (Mai) damit begonnen wird (selbst bei Vorhandensein neuer Wurzeln in 40 cm Bodentiefe).
3. Bei Überflur-Tropfbewässerung produzieren die Spargelpflanzen tendenziell höhere Pflanzenmassen als bei Unterflur-Bewässerung, wobei die WUE sich nicht signifikant von den unterflurig bewässerten Varianten unterscheidet.

Anwendungsempfehlungen für Tropfbewässerung im Spargelanbau:

- Nach diesen Untersuchungsergebnissen wäre die Überflur- der Unterflur-Tropfbewässerung vorzuziehen. Da aber nicht ausgeschlossen werden kann, dass bei regelmäßiger Fertigation andere Ergebnisse erzielt worden wären, möglicherweise zugunsten der Unterflur-Tropfbewässerung, konnte die Frage nach dem optimalen Bewässerungssystem für Spargel nicht abschließend geklärt werden.
- Die Applikation des Wassers in 25 cm Bodentiefe, d. h. direkt am Rhizom, stellt aufgrund des Beschädigungsrisikos für die Tropfschläuche während der Ernte nur mit ausreichender Entfernung zum Rhizom (ca. 15 cm) eine Alternative dar. Damit ließen sich auch mögliche negative Einflüsse hoher Wassergehalte in Rhizomnähe vermeiden.

5 N-Mineralisationskinetik organischer Dünger in sandigem Spargelboden

Kurzfassung

Die zunehmende Verwendung von Komposten im deutschen Spargelanbau erfordert eine detaillierte Untersuchung der Stickstoff-Mineralisation des Kompostes. Das Ziel dieser Untersuchungen war es daher, anhand von Klimakammerinkubationen über 200 Tage bei 10 und 20 °C die Mineralisationsparameter eines Zwei-Pool-Modells für Substratgemische aus typischem Spargelboden und Grüngut-Fertigkompost, Champignonkultursubstrat (Champost) bzw. üblicherweise eingesetztem Pferdemist bei jeweils gleicher C-Fracht (4000 kg C/ha) zu bestimmen. Mit Hilfe des Zwei-Pool-Modells konnte zwischen einem kleineren, schnell mineralisierbaren N-Pool, der vor allem frische Residuen umfasst, und einem größeren, langsam mineralisierbaren N-Pool unterschieden werden.

Das auf diese Weise ermittelte Mineralisationspotenzial des Grüngut-Komposts lag durchschnittlich bei 0 % N_{org} -Fracht des Kompostes. Dieser kann somit kaum zur N-Versorgung von Pflanzen beitragen. Die N-Fractionen des verwendeten Champosts waren zu knapp 8 % schnell und zu durchschnittlich 27 % langsam abbaubar. Der verwendete strohreiche Pferdemist wies eine N-immobilisierende Wirkung auf.

Insgesamt nahmen die schnell abbaubare N-Fraktion (N_{fast}) der organischen Substanz mit zunehmendem C/N-Verhältnis der organischen Dünger und der Anteil der organischen Dünger an der langsam abbaubaren N-Fraktion (N_{slow}) mit zunehmendem Rottegrad linear ab, wobei die geschätzten Poolgrößen N_{fast} und N_{slow} mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen vergleichbar waren. Die geschätzten Mineralisationsparameter des Zwei-Pool-Modells und deren Zusammenhänge können genutzt werden, um mit Modellen die unterschiedlichen Mineralisationsdynamiken organischer Dünger abzuschätzen.

Spezifische Arrheniusfunktionen für die verschiedenen organischen Dünger konnten nur mit einem Ein-Pool-Modellansatz bestimmt werden.

Die Simulation der N-Mineralisation unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld mit Hilfe der in vitro ermittelten Mineralisationsparameter zeigte eine relativ gute Übereinstimmung mit der in situ in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) gemessenen N-Mineralisation.

5.1 Einführung

Der Einsatz organischer Dünger ist im Spargelanbau von besonderer Bedeutung, da die intensive Bodenbelüftung beim Auf- und Abdämmen und der lange Zeitraum ohne Bewuchs den Humusgehalt der sandigen Spargelböden reduzieren. Traditionell wird als organischer Dünger Pferdemist eingesetzt, sofern dieser regional verfügbar ist. Fertigkomposte, hergestellt aus organischen Haushaltsabfällen (Biokompost) oder aus pflanzlichen Abfällen aus dem Landschaftsbau (Grünkompost), haben in der Vergangenheit hauptsächlich wegen ihrer Fähigkeit, die physikalischen Bodeneigenschaften zu verbessern, das Interesse der Spargelanbauer geweckt. Denn aufgrund der Abbaustabilität der mit reifen Komposten zugeführten organischen Substanz weisen Komposte unter den organischen Düngern die höchste Humusreproduktionsleistung auf, bewirken also eine vergleichsweise starke Humusanreicherung im Boden (Gutser & Ebertseder, 2002). Der Anteil an stabilen Humuskomponenten nimmt in folgender Reihenfolge ab: Fertigkompost > Frischkompost, Rottemist > Frischmist > Gülle, Stoppeln, Stroh > Zwischenfrüchte, Rübennblatt (Kasten, 2001).

Dem Düngungseffekt der Komposte wurde bislang wenig Bedeutung beigemessen. Insbesondere die Wirkung von Kompost auf die Stickstoff-Dynamik in Spargelböden wurde kaum systematisch untersucht. Detailliert untersucht wurde bislang u. a. die N-Mineralisierung aus Bioabfall-Fertigkompost in typischen Weinbergböden (Aric Anthrosole) von Nendel et al. (2004, 2005). Die Bioabfallverordnung (BioAbfV) (Anonym, 1998) regelt alle abfallrechtlichen Vorgaben für die landbauliche Verwertung von Komposten und erlaubt eine einmalige maximale Ausbringungsmenge von 30 t Trockensubstanz (TS) hochqualitativer Bioabfall-Komposte (Schadstoffhöchstgehalte laut § 4 Abs. 3, Satz 2 BioAbfV) pro Hektar innerhalb einer Periode von drei Jahren.

Um die Effizienz des mineralischen N-Einsatzes zu erhöhen, muss die saisonale N-Freisetzung aus der organischen Substanz im Boden berücksichtigt werden. Diese wird von den Lebensbedingungen des Edaphons bestimmt, welche neben den Bodeneigenschaften (pH, N_{org} , C_{org} , Ton, Oxiden,..), der Bodennutzung (inklusive Vorfrucht und Düngung) und dem Temperatur-, Wasser- und Lufthaushalt (Beck, 1983; Mengel et al., 1999; Olf et al., 1990; Springob & Mohnke, 1995; Stadelmann et al., 1983) auch vom Ausgangsmaterial, Rottegrad, C/N-Verhältnis, N-Gehalt sowie dem Zerkleinerungsgrad der organischen

Dünger beeinflusst wird (Nordmeyer, 1985; Scherer et al., 1996). Daher sind Informationen über standortspezifische und wetterabhängige N-Mineralisationsdynamiken von Spargelböden nötig, die auch die Art und Zusammensetzung der organischen Dünger berücksichtigen.

Zur Beschreibung von Mineralisationsprozessen im Boden wird gewöhnlich eine Kinetik für Reaktionen erster Ordnung mit zwei (oder mehr) N-Pools unterschiedlicher Größe und Abbaubarkeit verwendet. Dabei wird zwischen einem kleinen N-Pool aus schnell und einem größeren aus langsam zersetzbarer organischer Substanz unterschieden, wobei zwei sich überlagernde Exponentialfunktionen $N_{\min}(t) = N_0 * (1 - \exp(-k * t))$ mit N_0 als Mineralisationspotenzial und k als Reaktionskoeffizient benutzt werden (Heumann & Böttcher, 2004; Kersebaum, 1989; Nendel et al., 2004; Nordmeyer & Richter, 1985). Die Temperaturabhängigkeit der Reaktionskoeffizienten der zwei N-Pools wurde mit Langzeit-Laborinkubationen u. a. von Nordmeyer & Richter (1985) für Lössboden und von Heumann & Böttcher (2004) für sandigen Ackerboden in NW-Deutschland untersucht.

Ziel dieser Untersuchung war, anhand von Langzeit-Klimakammerinkubationen die Mineralisationsparameter eines Zwei-Pool-Modells wie im Modell HERMES (Kersebaum, 1989) für Substratgemische aus typischem Spargelboden und Grüngut-Fertigkompost, Champignonkultursubstrat (Champost) bzw. traditionell eingesetztem Pferdemit bei jeweils gleicher C-Fracht zu bestimmen. Dabei sollte geprüft werden, ob Unterschiede im Mineralisationspotenzial der Substratgemische mit Hilfe der interaktiven Wirkung zwischen den Qualitätsparametern Rottegrad und C/N-Verhältnis der organischen Dünger erklärt werden können.

5.2 Material & Methoden

5.2.1 Organische Dünger

Der untersuchte Pferdemist (PM 02) zeichnete sich durch einen geringen Gehalt an Exkrementen und hohem Strohanteil aus. Bei dem verwendeten Champignonkultursubstrat (Champost, CK) handelte es sich um abgetragenes Substrat aus der Champignonzucht, dessen Ausgangsstoffe Pferdemist, Stroh und verschiedene Zuschlagstoffe wie Hühnerkot, Zuckerrübenschnitzel, Kalk, etc. sein können. Der als vollständig verrottet klassifizierte Grüngut-Fertigkompost (FK 02) stammte aus einer Kompostierungsanlage und entsprach den Qualitätskriterien der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (Anonym, 1999b).

Die organischen Dünger unterschieden sich neben ihrem Ausgangsmaterial auch hinsichtlich ihrer chemischen und biologischen Eigenschaften vor allem bezüglich des Rottegrades und C/N-Verhältnisses (Tab. 5.1). Zwischen den Qualitätsparametern Rottegrad und C/N-Verhältnis bestand keine Korrelation.

Tab. 5.1: Chemische und biologische Eigenschaften der organischen Dünger

	TM	Org. Substanz	C _t	N _t	C _t /N _t	Rottegrad	pH
	%	———— % in TM —————	—————	—————	-	-	-
FK 02	59.7	32.1	17.3	1.1	15	5	7.6
PM 02	25.3	81.0	44.4	1.2	29	1*	7.5
CK	39.9	62.7	32.6	2.5	13	3 (4)**	7.1

* nicht bestimmt, aber nach Augenschein als unverrottet eingestuft

** Von der LUFA Hameln dem Rottegrad 4 (Fertigkompost) zugeordnet, bei den durchgeführten Untersuchungen traten jedoch deutliche Eigenschaften eines Frischkompostes hervor, daher in den Untersuchungen dem Rottegrad 3 zugeordnet.

5.2.2 Spargelboden und Substratgemische

Für die Untersuchungen wurde ein typischer Spargelboden (humoser Sand) aus dem Fuhrberger Feld nördlich von Hannover verwendet, der im März aus den oberen 30 cm des Bodens einer Spargelanlage im sechsten Standjahr entnommen wurde (Tab. 5.2). Die Wasserkapazität des vorab grob gesiebten und homogenisierten Bodens wurde durch Aufsättigen eines 30 l-Gefäßes und anschließende Entnahme einer Stechzylinderprobe (200 cm³), die bei 105 °C getrocknet wurde, bestimmt. Aus der Gewichts Differenz des Bodens vor und nach der Trocknung ergab sich die Wasserkapazität. Die organischen Dünger wurden dem feldfeuchten Boden jeweils mit einer Aufwandmenge von

4000 kg C/ha bezogen auf eine Schichtdicke von 30 cm und eine Lagerungsdichte (d_B) von 1.4 g/cm^3 zugesetzt und anschließend gut vermischt. Bis zur Anfertigung der Substratgemische wurde der humose Sandboden bei ambienten Außentemperaturen und die organischen Dünger bei konstant 8 °C gelagert, um eine zu starke Änderung der Umweltbedingungen mit Inkubationsbeginn zu verhindern. Um eine möglichst homogene Verteilung des Pferdemistes im Substratgemisch zu erreichen, wurde dieser vorab etwas zerkleinert.

Tab. 5.2: Physikalische und chemische Eigenschaften des Spargelbodens und der Substratgemische mit organischer Düngung

	C_t	N_{org}	C_t/N_{org}	Sand	Ton	pH (CaCl_2)	N_{min}
	— % in TM —			— % —		-	kg N/ha*
Humoser Sand (Kontrolle)	1.719	0.077	22.3	94.0	1.7	5.3	7.69
FK 02	1.534	0.068	22.2			5.7	21.99
PM 02	1.528	0.068	22.1			6.0	25.31
CK	1.764	0.081	21.0			5.8	47.89

* Umrechnung in kg N/ha erfolgte in Bezug auf eine Schichtdicke von 30 cm und eine Lagerungsdichte von 1.4 g/cm^3

5.2.3 Bodenanalysen

Die Methoden zur Untersuchung des Bodens und der organischen Dünger sind in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Die Umrechnung in kg/ha erfolgte jeweils in Bezug auf eine Schichtdicke von 30 cm und eine Lagerungsdichte von 1.4 g/cm^3 .

5.2.4 Inkubation

Von den Substratgemischen wurden jeweils 500 g in Kunststoffgefäße mit perforiertem Deckel eingewogen und bis zu 203 Tagen in Klimakammern bei 10 und 20 °C inkubiert. Die Auswertung der Proben erfolgte an den Tagen 3, 7, 14, 28, 49, 83, 117, 145, 173 und 203. Pro Variante und Termin wurden fünf Wiederholungen entnommen und ihr N_{min} -Gehalt bestimmt. Insgesamt wurden 400 Kunststoffgefäße (4 Substratgemische x 2 Temperaturstufen x 5 Wiederholungen x 10 Auswertungstermine) für die Inkubationen vorbereitet. Der zu Inkubationsbeginn ermittelte Wassergehalt des feldfeuchten Bodens von 60 % WK wurde während der gesamten Inkubation durch Wiegen der Gefäße und Aufgießen auf das Ausgangsgewicht von 500 g konstant gehalten.

5.2.5 Parameterschätzung

Die Parameter der Mineralisationskinetik der Substrate wurden geschätzt, indem die Kinetik für Reaktionen erster Ordnung mit zwei Pools dem Verlauf der kumulierten N-Nettomineralisation (NO_3^- -N und NH_4^+ -N, kg N/ha, Mittelwerte aus fünf Wiederholungen) angepasst wurde (Richter, 1986; Stanford & Smith, 1972). Dabei wurde $N_{\text{min}}(t)$, die Menge an mineralisiertem N zum Zeitpunkt t , unterteilt in Mineralisation aus zwei N-Pools mit unterschiedlicher Abbaubarkeit. Während N_{fast} das leicht mineralisierbare organische N umfasst (Ernterückstände,...), repräsentiert der zweite, größere Pool N_{slow} das schwer mineralisierbare, stabilere, humufizierte organische Material (Nordmeyer, 1985).

$$N_{\text{min}}(t) = N_{\text{fast}} * (1 - \exp(-k_{\text{fast}} * t)) + N_{\text{slow}} * (1 - \exp(-k_{\text{slow}} * t)) \quad (1)$$

$N_{\text{min}}(t)$ = potenziell mobilisierbare N-Menge zum Zeitpunkt t (kumulativ, netto)

$N_{\text{fast}}, N_{\text{slow}}$ = Größe des schnell und langsam abbaubaren N-Pools, ($N_{\text{fast}} + N_{\text{slow}}$ = mineralisationsfähiger Stickstoff)

$k_{\text{fast}}, k_{\text{slow}}$ = (Mobilisations-) Ratenkonstanten (1/d) für den schnell und langsam abbaubaren N-Pool

Die Parameterschätzungen wurden mit SigmaPlot 8.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) vorgenommen. Zunächst wurden die nach den Arrheniusfunktionen $k(T) = a * \exp^{-b/(T + 273)}$ (T = Temperatur) (2)

von Nordmeyer & Richter (1985) für Lössboden und Heumann & Böttcher (2004) und der ‚Best fit‘-Funktion von Heumann & Böttcher (2004) für sandigen Ackerboden ermittelten temperaturabhängigen Ratenkonstanten k_{fast} und k_{slow} (Abb. 5.1) für 20 °C in Gleichung 1 eingesetzt. Dar aus ergaben sich trotz Bestimmtheitsmaßen (r^2) zwischen 0.91 und 0.97 fragwürdige Werte für den Parameter N_{fast} , die teilweise auf 0 geschätzt wurden (negative Parameterwerte wurden ausgeschlossen). N_{fast} wurde daher für alle Varianten bei Inkubation mit 20 °C durch Anwendung der grafischen Methode nach Nordmeyer (1985) ermittelt. Dabei ergibt sich die N_{fast} -Fraktion indem der zweite Teil des Mineralisationsverlaufs (ab vier bis fünf Halbwertszeiten) vereinfacht als eine lineare Funktion dargestellt und diese Gerade bis zur Ordinate verlängert wird. Die grafischen Ableitungen wurden auf Basis des k_{fast} der Arrheniusfunktion für sandigen Ackerboden (Heumann & Böttcher, 2004) vorgenommen, nach dem die

Halbwertszeit bei 20 °C rund 41.5 Tage beträgt. Die N_{slow} -Fraktion wurde nach Vorgabe der k_{fast} -, k_{slow} - und N_{fast} -Werte mit Gleichung 1 berechnet. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellansätze wurden gegenüber gestellt und die Qualität ihrer Anpassung unter Verwendung der ermittelten Schätzwerte für N_{fast} und N_{slow} bei 10 °C überprüft. Der Einfluss der organischen Dünger auf den Reaktionskoeffizienten $k_{\text{one-pool}}$ bzw. auf die Arrheniuskonstanten a und b wurde bestimmt, indem die Kinetik für Reaktionen erster Ordnung mit einem N-Pool dem Verlauf der kumulierten N-Nettomineralisation angepasst wurde (Gl. 3):

$$N_{\text{min}}(t) = N_{\text{one-pool}} * (1 - \exp(-k_{\text{one-pool}} * t)) \quad (3)$$

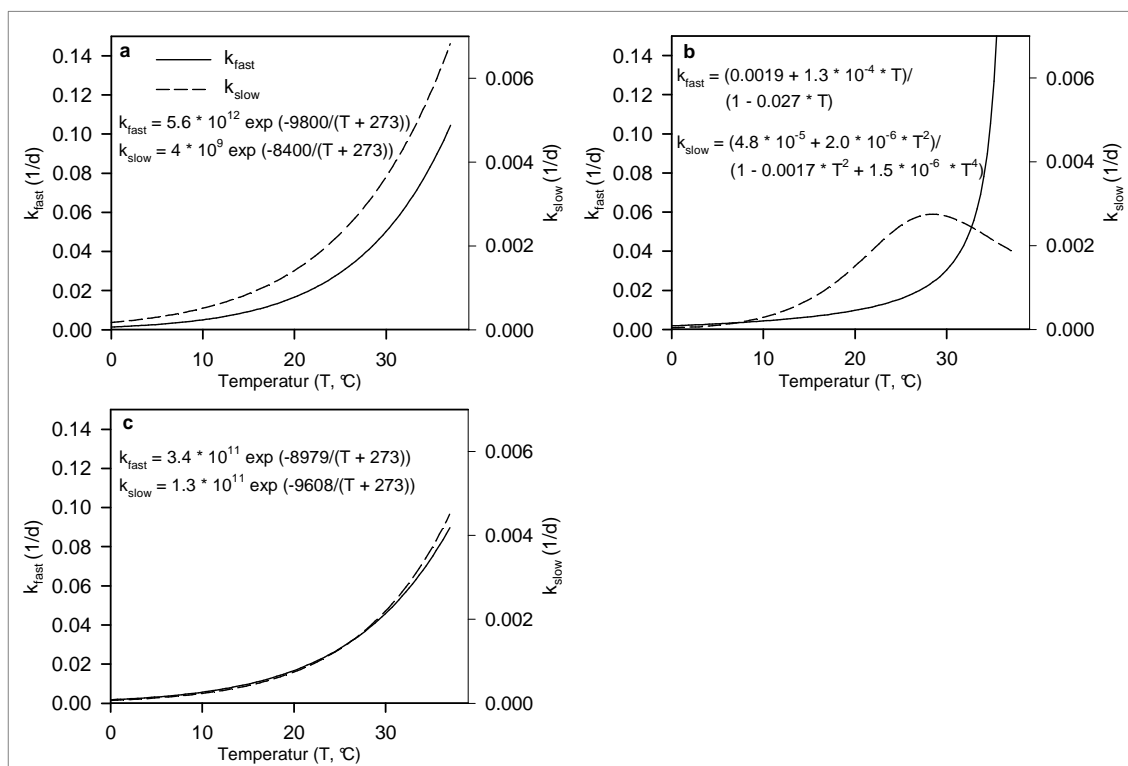


Abb. 5.1: Grafische Darstellung der Temperaturfunktionen Arrhenius nach Nordmeyer & Richter (1985) (a) sowie ‚Best fit‘ (b) und Arrhenius (c) nach Heumann & Böttcher (2004) für k_{fast} und k_{slow}

Um die N-Mineralisation aus den organischen Düngern mit Hilfe der N-Pool-Größen N_{slow} und N_{fast} zu charakterisieren, muss der Anteil der organischen Dünger an der N-Mineralisation ermittelt werden. Dieser ergibt sich aus der Differenz zwischen Kontrolle und den Behandlungen mit organischer Düngung. Auf Basis der N_{org} -Fracht der organischen Dünger (= N_{t} -Fracht - N_{min} (Substrat) + N_{min} (Kontrolle)) kann der Anteil der organischen Dünger an den schnell (N_{fast}) und langsam (N_{slow}) abbaubaren N-Pools folgendermaßen berechnet werden:

$$F (\% N_{\text{org-Fracht}}) = \frac{N_{\text{fast}} (\text{Substratgemisch}) - N_{\text{fast}} (\text{Kontrolle})}{N_{\text{org-Fracht org. Dünger}} * 100 \% \quad (4)$$

$$S (\% N_{\text{org-Fracht}}) = \frac{N_{\text{slow}} (\text{Substratgemisch}) - N_{\text{slow}} (\text{Kontrolle})}{N_{\text{org-Fracht org. Dünger}} * 100 \% \quad (5)$$

Dabei steht F (% $N_{\text{org-Fracht}}$ des organischen Düngers) für den Anteil des organischen Düngers am N_{fast} - und S für den entsprechenden Anteil am N_{slow} -Pool.

5.2.6 Inkubation in situ

Neben der Inkubation in Klimakammern wurde die N-Mineralisation der organischen Dünger auch in situ vom 11.4.02 – 3.6.04 in einem Feldversuch in einer Spargeljunganlage (FV 02-04, Kap. 3) auf humosem Sandboden (vgl. Kontrolle) im Fuhrberger Feld bei Hannover untersucht, wo die organischen Dünger im März 2002 mit einer Aufwandmenge von 4000 kg C/ha ausgebracht wurden. Die Untersuchungen erfolgten nach der Methode von Runge (1970). Dazu wurden je Parzelle zwei möglichst ungestörte Bodenproben aus Spargeldämmen und eine aus der Mitte des Weges zwischen diesen diagonal aus dem Oberboden (5 – 10 cm Tiefe) entnommen. Diese Probenahme erfolgte pro Variante in vier Parzellen. Ein Teil der Proben kam zur Bestimmung der N_{min} -Gehalte ins Labor, der andere wurde in Polyethylen (PE)-Beuteln an der Entnahmestelle für sechs bis acht Wochen vergraben und dann der N_{min} -Endgehalt bestimmt. Die Differenz von N_{min} -Gehalt zu Beginn und Ende der Inkubation stellt die Mineralisation für den definierten Zeitraum dar. Im Abstand von vier bis fünf Wochen wurden neue Versuchsreihen gestartet, so dass sich zwei Versuchsreihen jeweils überschneiden. Aus diesen wurden neben durchschnittlichen täglichen Raten durch Aufsummierung dieser u.a. auch monatliche Mineralisationsraten ermittelt (Meins, 1996), wobei berücksichtigt wurde, dass Mineralisation nur bei $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$ stattfindet. Die innerhalb einer Parzelle ermittelten Raten aus den Spargeldämmen wurden bei den Auswertungen jeweils gemittelt und dann gemäß ihrem Flächenanteil im Verhältnis 2 (Damm) zu 1 (Weg) mit den Raten aus dem Weg gemittelt. Bei der Simulation der N-Mineralisation mit den Daten aus den Klimakammern wurden in Dasselsbruch (10 km östlich vom Feldversuch, LWK Niedersachsen) in 5 cm Bodentiefe erfasste Bodentemperaturen verwendet.

5.2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm SAS[®] 8e (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) vorgenommen. Die erhobenen Daten wurden zunächst mit der SAS-Prozedur PROC GLM varianzanalytisch getestet und anschließend einem Mittelwertsvergleich unterzogen (Tukey-Test), wobei eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % galt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Kumulierte N-Nettomineralisations-Modelle der Substrate

In allen Substraten war die kumulierte N-Mineralisation bei 20 °C höher als bei 10 °C (Abb. 5.2a,b). Bezüglich der N-Freisetzung aus dem CK-Substrat, konnten in Abhängigkeit von der Temperaturstufe Wechselwirkungen festgestellt werden. Die CK-Variante erzielte bei 10 °C nach anfänglicher N-Immobilisierung eine signifikant höhere Nettomineralisation als die PM 02-Variante und bei 20 °C war die Nettomineralisation ab dem 117. Tag (Abb. 5.2b) der Inkubation signifikant höher als bei den anderen Varianten. Der eingesetzte Pferdemist führte jeweils zu einer N-Immobilisation, die bis zum Versuchsende nicht vollständig ausgeglichen werden konnte, was der Verlauf der kumulierten Nettomineralisation der PM 02-Variante unterhalb der Kontrolle zeigt. Bei 20 °C traten zwischen dem 83. und 117. Tag der Inkubation in allen Varianten relativ zu den Zeiträumen direkt vor- und hinterher deutlich höhere Mineralisationsraten auf. Das für die Parameterschätzung ausgewählte Zwei-Pool-Modell ist gerechtfertigt, wenn die kumulierten Nettomineralisationskurven einen Sättigungs-Verlauf aufweisen. Bei 20 °C taten dies alle Varianten mit Ausnahme der PM 02-Variante, wobei die Mineralisationsraten ab dem 49. Tag der Inkubation deutlich abnahmen. Bei Inkubation mit 10 °C erreichte neben der PM 02- auch die kumulierte Nettomineralisationskurve der CK-Variante keine Sättigung. Die grafische Ableitung des Parameters N_{fast} machte es dennoch möglich, die PM 02-Variante mit dem exponentiellen Modellansatz zu beschreiben.

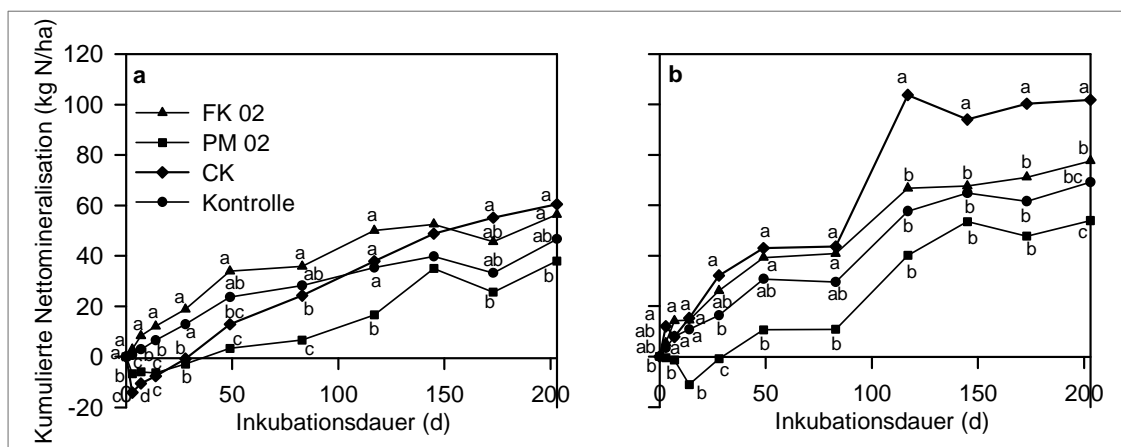


Abb. 5.2: Kumulierte N-Nettomineralisation der Substrate bei 10 (a) und 20 °C (b), Angaben für eine 30 cm mächtige Bodenschicht bei 1.4 g/cm³; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede

5.3.2 Parameterschätzung für verschiedene organische Dünger mit Zwei-Pool-Modellansätzen

Die Anwendung der grafischen Methode nach Nordmeyer (1985) führte zu Schätzwerten für N_{fast} zwischen 6.0 und 61.0 kg N/ha (Abb. 5.3, Tab. 5.3). Für die Substrate mit organischer Düngung ergab sich eine lineare Beziehung zwischen den N_{fast} -Werten und dem C/N-Verhältnis der organischen Dünger (Abb. 5.4a). Mit Hilfe der Zwei-Pool-Modellansätze konnten bei Verwendung der unterschiedlichen Temperaturfunktionen für k_{fast} und k_{slow} (Abb. 5.1) N_{slow} -Werte mit Gl. 1 zwischen 117.5 und 351.4 kg N/ha berechnet werden (Tab. 5.3). Dabei traten die höchsten N_{slow} -Werte bei der Arrheniusfunktion nach Heumann & Böttcher (2004) auf. Der Parameter N_{slow} wies weder zum C/N-Verhältnis noch zum Rottegrad der organischen Dünger einen linearen Zusammenhang auf.

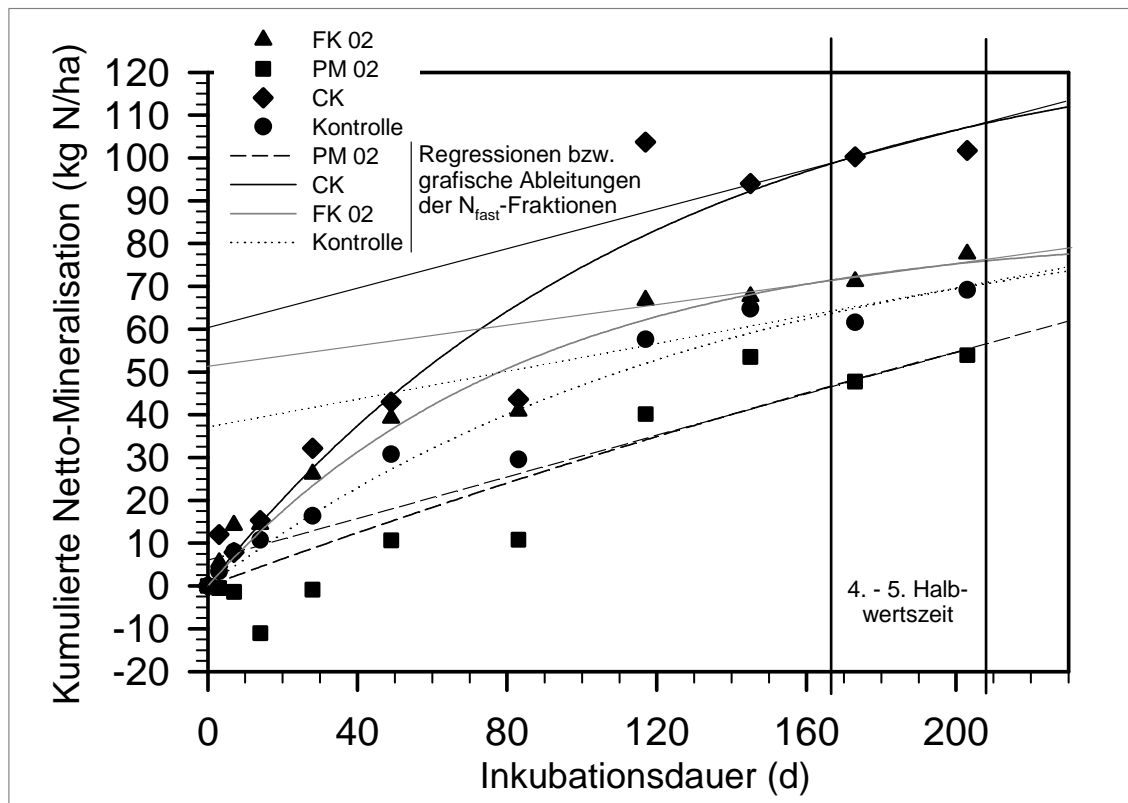


Abb. 5.3: Grafische Bestimmung des Parameters N_{fast} anhand der Mineralisationsverläufe nach Nordmeyer (1985); Dabei wird der zweite Teil des Mineralisationsverlaufes bei 20 °C (ab 4 - 5 Halbwertszeiten) vereinfacht als eine lineare Funktion dargestellt und die Gerade bis zur Ordinate verlängert. Der Schnittpunkt mit der Ordinate stellt den Schätzwert für die N_{fast} -Fraktion dar.

Die Summe $N_{fast} + N_{slow}$ entspricht der Menge an insgesamt mineralisierbarem Stickstoff. Diese war in allen Modellansätzen bei der CK-Variante am höchsten

und bei der FK 02-Variante bei den Arrhenius-Modellen am geringsten. Bei durchschnittlich etwa 0.07 % organischem N (N_{org}) in TM der untersuchten Substratgemische entsprach das Gesamtmineralisationspotenzial je nach verwendetem Modell einem Anteil von 5.6 - 12.1 % am Gesamtboden-N und war bei der CK-Variante am höchsten. Zusammenhänge zwischen $N_{fast} + N_{slow}$ und dem Rottegrad oder C/N-Verhältnis der organischen Dünger konnten nicht festgestellt werden.

Tab. 5.3: Durch Anwendung der grafischen Methode nach Nordmeyer (1985) ermittelte Schätzwerte für N_{fast} (kg N/ha) und durch Anpassung von Gl. 1 an die experimentellen Daten verschiedener Boden-Organischer-Dünger-Gemische gewonnenen Schätzwerte für N_{slow} (kg N/ha)

	N_{fast}	Arrheniusfunktion				,Best fit'	
		Nordmeyer & Richter (1985)		Heumann & Böttcher (2004)		Heumann & Böttcher (2004)	
		N_{slow}	r^2	N_{slow}	r^2	N_{slow}	r^2
FK 02	50.0	117.5	0.97	211.5	0.97	148.6	0.95
PM 02	6.0	194.6	0.87	351.4	0.87	187.9	0.88
CK	61.0	192.0	0.93	346.2	0.93	227.3	0.93
Kontrolle	37.5	131.4	0.96	237.0	0.96	152.3	0.96

Im Gegensatz zu den FK 02- und CK-Varianten, die mit einem relativ niedrigen C/N-Verhältnis positive F-Werte (% N_{org} -Fracht des organischen Düngers für den Anteil des organischen Düngers am N_{fast} -Pool) aufwiesen, stand der negative F-Wert der PM 02-Variante für eine N-Immobilisation von leicht verfügbarem N aus dem N_{fast} -Pool. Zwischen F und dem C/N-Verhältnis der organischen Dünger bestand ein enger linearer Zusammenhang, wobei F mit zunehmendem C/N-Verhältnis abnahm (Abb. 5.4a, Tab. 5.4).

Der S-Wert (entsprechender Anteil am N_{slow} -Pool) der PM 02-Variante war in allen Modellansätzen höher als bei den anderen Varianten. Mit der Arrheniusfunktion nach Heumann & Böttcher (2004) wurde sogar ein Anteil des Pferdemistes an N_{slow} von 103.6 % geschätzt, was unter Berücksichtigung der N-Immobilisation von leicht verfügbarem N aus dem N_{fast} -Pool, das in den N_{slow} -Pool übergeht, denkbar ist. Bei der FK 02-Variante wurden in allen Modellansätzen negative S-Werte geschätzt. Zwischen S und dem Rottegrad der organischen Dünger bestanden bei allen Modellansätzen mehr oder weniger enge lineare Zusammenhänge, wobei S mit zunehmendem Rottegrad abnahm

(Abb. 5.4b, Tab. 5.4). Die Summe aus F und S nahm bei Verwendung der Arrheniusfunktion nach Heumann & Böttcher (2004) mit zunehmendem Rottegrad ab (ohne Abb.). Bei den anderen Modellansätzen ergab sich weder ein linearer Zusammenhang zwischen F + S und dem Rottegrad noch dem C/N-Verhältnis der organischen Dünger.

Tab. 5.4: Lineare Zusammenhänge zwischen N_{fast} sowie F und dem C/N-Verhältnis bzw. S und dem Rottegrad der organischen Dünger (F = Anteil der organischen Dünger an N_{fast} , S = Anteil der organischen Dünger an N_{slow})

Gleichung	r^2	verwendete Funktion	Gl.
$N_{fast} = 102.2 - 3.33 * \text{C/N-Verhältnis}$	0.99	grafisch Nordmeyer (1985)	(6)
$F = 38.2 - 2.30 * \text{C/N-Verhältnis}$	1		(7)
$S = 55.2 - 15.57 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.99	Arrhenius Nordmeyer & Richter (1985)	(8)
$= 99.8 - 28.16 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.99	Arrhenius Heumann & Böttcher (2004)	(9)
$= 35.3 - 8.39 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.91	„Best fit“ Heumann & Böttcher (2004)	(10)

Die gemessene kumulierte Nettomineralisation aus den organischen Düngern (kg N/ha) konnte unter Verwendung von Gl. 6 - 10 zur Ermittlung von F und S, multipliziert mit der N_{org} -Fracht der organischen Dünger / 100, durch alle drei Modellansätze bei 20 °C relativ gut geschätzt werden (Abb. 5.4c,e). Dabei lag das Bestimmtheitsmaß (r^2) der 1 : 1-Regression bei den Arrheniusfunktionen, die nahezu identische Werte aufwiesen, insgesamt mit 0.84 höher als bei der „Best fit“-Funktion nach Heumann & Böttcher (2004) mit 0.74 (Abb. 5.4c).

Waren die Parameter N_{fast} und N_{slow} bei 10 °C vorgegeben und wurden gleichfalls die k_{fast} und k_{slow} -Werte nach den unterschiedlichen Temperaturfunktionen berechnet und vorgegeben, so ergab sich bei keinem Modellansatz eine Konvergenz zwischen der gemessenen und geschätzten kumulierten Nettomineralisation aus den organischen Düngern ($r^2 = 0$) (Abb. 5.4d,f). Insgesamt waren die nach den verwendeten Temperaturfunktionen errechneten Parameter k_{fast} und k_{slow} für die gemessenen N-Nettomineralisationskurven bei 10 °C deutlich zu niedrig. Darüber hinaus kamen bei den Modellansätzen auch die Wechselwirkungen der CK-Variante in Abhängigkeit von der Temperaturstufe nicht zum Ausdruck.

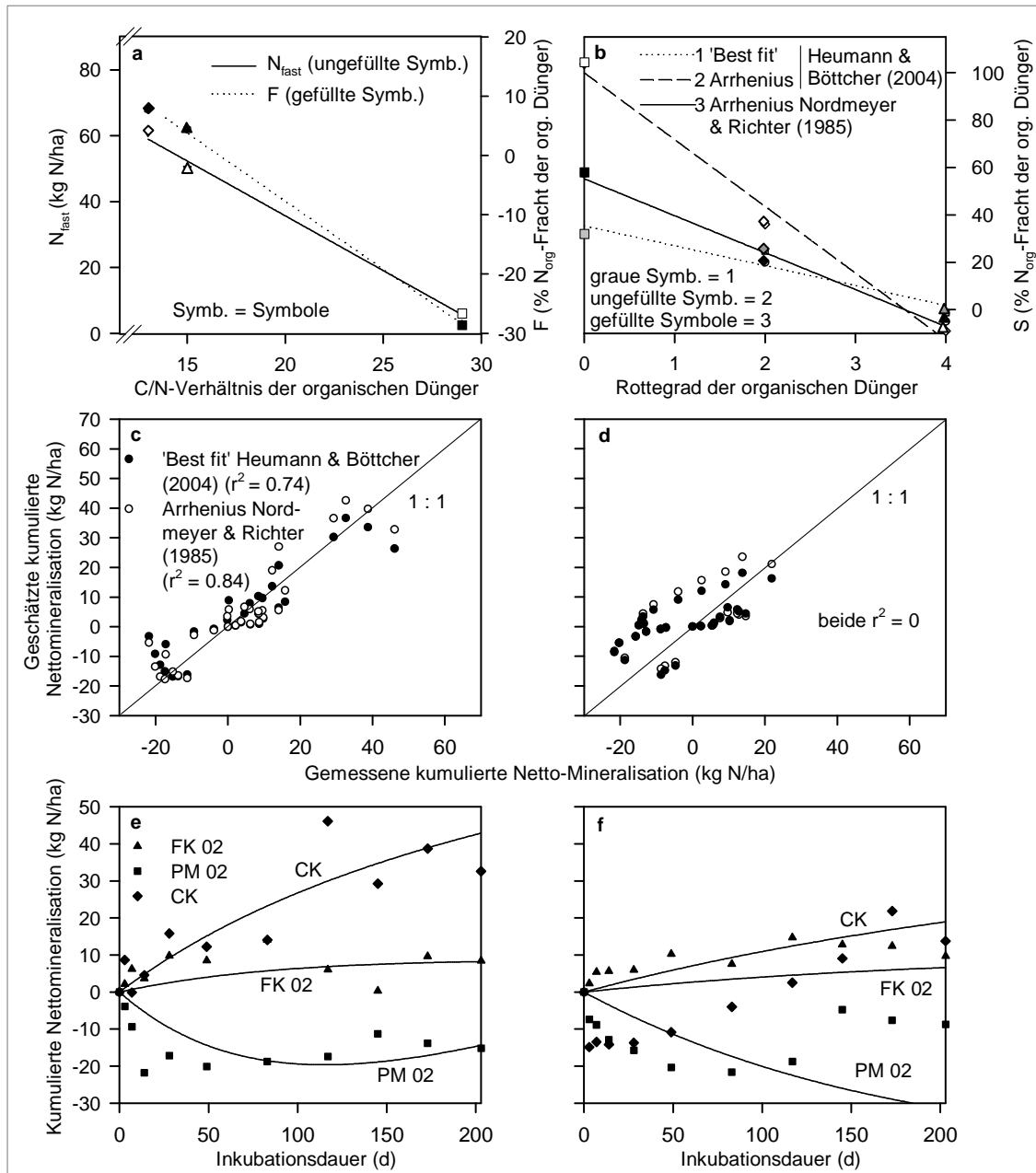


Abb. 5.4: Lineare Beziehungen von N_{fast} und F zum C/N-Verhältnis (a) bzw. S zum Rottegrad (b) der organischen Dünger (F = Anteil der organischen Dünger an N_{fast} , S = Anteil der organischen Dünger an N_{slow}) sowie die Gegenüberstellung der gemessenen kumulierten Nettomineralisation aus den organischen Düngern mit der geschätzten bei 20 °C (c, e) und 10 °C (d, f) (bei 10 °C k_{fast} - und k_{slow} -Werte aus den Modellansätzen und die bei 20 °C ermittelten N_{fast} - und N_{slow} -Werte vorgegeben). In e, f nur ‚Best fit‘-Modell nach Heumann & Böttcher (2004) abgebildet.

Der k_{fast} -Wert wurde aus den Mineralisationskurven der Kontrolle und FK 02-Variante bei 10 °C unter Vorgabe der N_{fast} - und N_{slow} -Schätzwerte auf dem gleichen Niveau wie bei 20 °C geschätzt. Demnach wäre k_{fast} in diesem Fall nicht temperaturabhängig gewesen. Insgesamt konnten bei 10 °C aber keine k_{fast} und

k_{slow} -Werte abgeleitet werden, die mit allen Nettomineralisationskurven konvergierten. Bei 10 °C traten somit unterschiedliche Mineralisationsraten der organischen Dünger zum Vorschein, die bei 20 °C nicht ausschlaggebend waren, bei 10 °C aber berücksichtigt werden mussten, um die Anpassung an die gemessenen N-Mineralisationskurven zu optimieren. Da der Zwei-Pool-Modellansatz insbesondere aufgrund des nicht-exponentiellen Verlaufs der Nettomineralisationskurven der PM 02- und CK-Varianten bei 10 °C nicht geeignet war, um entsprechende Parameterschätzungen vorzunehmen, wurde dazu auf eine einfache Mineralisationskinetik mit nur einem N-Pool zurückgegriffen.

5.3.3 Parameterschätzung für verschiedene organische Dünger mit Ein-Pool-Modellansatz

Die Verwendung eines einfachen exponentiellen Modellansatzes mit nur einem N-Pool führte bei 20 °C zu Schätzwerten für $N_{\text{one-pool}}$ von 13 % N_{org} -Fracht der CK- und -2.6 % N_{org} -Fracht der FK 02-Variante (errechnet wie F bzw. S). Der $N_{\text{one-pool}}$ wurde bei der FK 02-Variante somit wie der N_{slow} -Pool beim Zwei-Pool-Modell geringer eingeschätzt als bei der Kontrolle. Aufgrund des nicht-exponentiellen Kurvenverlaufs der Nettomineralisation der PM 02-Variante bei beiden Temperaturstufen konnte die Größe von $N_{\text{one-pool}}$ bei der PM 02-Variante mit diesem Modellansatz nicht geschätzt werden. Daher wurde der mit dem Zwei-Pool-Arrhenius-Modell nach Heumann & Böttcher (2004) ermittelte Schätzwert für F + S, der mit 75 % N_{org} -Fracht des Pferdemistes den Maximalwert unter den Modellansätzen darstellte, als Größe für $N_{\text{one-pool}}$ angenommen. $N_{\text{one-pool}}$ (kg N/ha) nahm so mit zunehmendem Rottegrad linear und $N_{\text{one-pool}}$ (% N_{org} -Fracht der organischen Dünger) exponentiell ab (Abb. 5.5a, Tab. 5.5). Die Schätzwerte für $N_{\text{one-pool}}$ (kg N/ha) lagen insgesamt deutlich unterhalb der mit den Zwei-Pool-Modellansätzen geschätzten N_{slow} -Werte. $N_{\text{one-pool}}$ (kg N/ha) entsprach, ausgenommen bei der PM 02-Variante, in dem Arrhenius-Modell nach Nordmeyer & Richter (1985) und dem ‚Best fit‘-Modell nach Heumann & Böttcher (2004) in etwa dem Mittelwert aus N_{fast} und N_{slow} .

Wie schon beim Zwei-Pool-Modellansatz wurde auch beim Modellansatz mit einem N-Pool das bei 20 °C ermittelte N-Mineralisationspotenzial bei 10 °C angenommen. Im Gegensatz zum Mineralisationspotenzial stieg der Reaktionskoeffizient $k_{\text{one-pool}}$ sowohl bei 20 °C als auch bei 10 °C mit zunehmendem Rottegrad

linear an (Abb. 5.5b, Tab. 5.5), wobei der Einfluss der Temperatur auf die ermittelten Reaktionskoeffizienten der organischen Dünger mit zunehmendem Rottegrad stärker wurde.

Um den unterschiedlichen Temperatureinfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit $k_{\text{one-pool}}$ zu beschreiben, wurden individuelle Arrheniusfunktionen für alle Varianten errechnet (Abb. 5.5c, Tab. 5.5). Dabei wurde deutlich, dass die Konstanten a und b der Arrheniusfunktionen, die einen Temperaturbereich von $T \rightarrow \infty$ beschreiben, stärker vom C/N-Verhältnis als vom Rottegrad der organischen Dünger beeinflusst werden. Die Arrheniuskonstante b , die das Verhältnis zwischen der Aktivierungsenergie und der idealen Gaskonstante darstellt, nahm mit zunehmendem C/N-Verhältnis linear ab, während die Arrheniuskonstante a sogar exponentiell abnahm. Die Konstanten a und b der Kontrolle waren mit $1.01 \cdot 10^6$ bzw. 5490.3 etwas größer als bei der PM 02-Variante und deutlich geringer als bei den CK- und FK 02-Varianten.

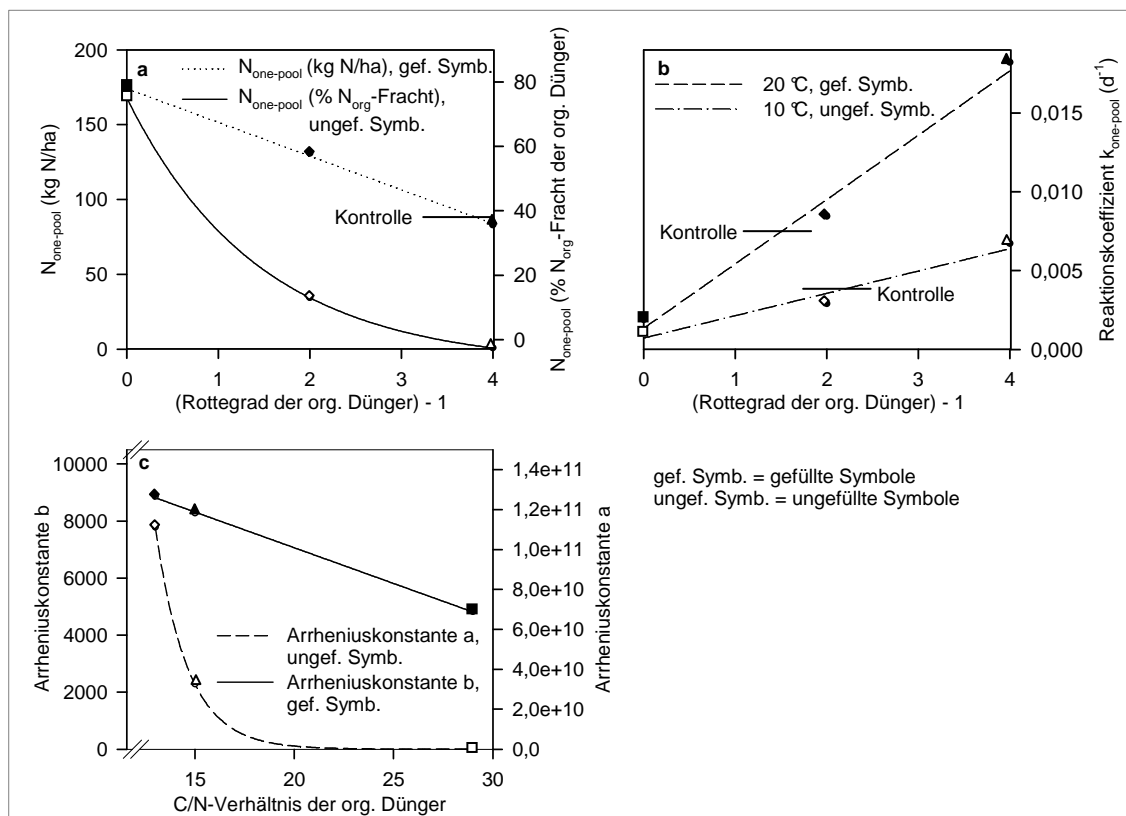


Abb. 5.5: Beziehungen der Mineralisationsparameter $N_{\text{one-pool}}$ (a) und $k_{\text{one-pool}}$ bei 10 und 20 °C (b) zum Rottegrad der organischen Dünger (Vergleichswerte der Kontrolle markiert) sowie Beziehungen der Arrheniuskonstanten a und b (Gl. 2) zum C/N-Verhältnis der organischen Dünger (c)

Tab. 5.5: Lineare und exponentielle Zusammenhänge zwischen verschiedenen Mineralisationsparametern und dem Rottegrad bzw. C/N-Verhältnis der organischen Dünger bei Verwendung einer einfachen Mineralisationsgleichung mit einem N-Pool

Gleichung		r^2
$N_{\text{one-pool}}$ (kg N/ha)	$= 174.0 - 22.52 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.99
$N_{\text{one-pool}}$ (% N_{org} -Fracht)	$= -7.85 + 82.84 * e^{(-0.69 * \text{Rottegrad}-1)}$	1
$k_{\text{one-pool}}$ (10 °C, d^{-1})	$= 0.0007 + 0.0014 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.96
$k_{\text{one-pool}}$ (20 °C, d^{-1})	$= 0.0013 + 0.0041 * (\text{Rottegrad} - 1)$	0.99
Arrheniuskonstante a	$= e^{(-0.6135 * (\text{C/N-Verhältnis} - 54.46))}$	1
Arrheniuskonstante b	$= 1.2 * 10^4 - 250.1 * \text{C/N-Verhältnis}$	1

5.3.4 Simulation der N-Mineralisation unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld mit Hilfe der in vitro ermittelten N-Mineralisationskinetik der Substratgemische und Vergleich mit in situ gemessener N-Mineralisation

Bei der Simulation der kumulierten N-Nettomineralisation der Substratgemische unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld für den Zeitraum vom 11.04.2002 - 03.06.2004 werden die temperaturbedingten jahreszeitlichen Schwankungen der N-Mineralisation deutlich (Abb. 5.6). Die insgesamt in diesem Zeitraum geschätzte N-Freisetzung lag in Abhängigkeit vom Substrat zwischen 109 kg N/ha (PM 02, Abb. 5.6b) und 373 kg N/ha (CK, Abb. 5.6c). Mit dem ‚Best fit‘-Modell nach Heumann & Böttcher (2004) wurde die N-Mineralisation im Vergleich zu den Arrhenius-Modellen jeweils am geringsten geschätzt. Die in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) in situ gemessene N-Mineralisation befand sich in vergleichbarer Größenordnung. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten traten dabei während des gesamten Untersuchungszeitraumes nicht auf. Insbesondere bei der FK 02-Variante (Abb. 5.6a) und der Kontrolle (Abb. 5.6d) gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen simulierter und gemessener N-Mineralisation. Bei der PM 02-Variante lag die gemessene N-Mineralisation deutlich über der simulierten, bei der CK-Variante war es hingegen genau andersherum. Hierbei ist zu beachten, dass es unter Feldbedingungen vermutlich keine N-Immobilisierung, wie sie bei der PM 02-Variante in den in vitro-Inkubationen festgestellt wurde, gegeben hat, da betriebsüblich rechtzeitig eine N-Ausgleichsdüngung vorgenommen wurde. In dem Fall sind die Abweichungen zwischen simulierter und gemessener N-Mineralisation also durchaus gerechtfertigt.

Neben den Inkubationsversuchen kann die N-Mineralisation im Feldversuch auch mit Hilfe einer N-Bilanz geschätzt werden. Dazu wurden regelmäßige N_{\min} (Abb. 8.2, Anhang) und Pflanzenuntersuchungen durchgeführt. Aus der N-Bilanz von Mitte März bis Anfang Oktober 2003 (Tab. 5.6), das entspricht der zweiten Vegetationsperiode der Spargelkultur, geht hervor, dass der Saldo Input – Output ein Defizit von 22.6 – 70.6 kg N/ha ergab. Dieses Defizit muss aus der N-Mineralisation gedeckt worden sein. Werden die N-Verluste während der Vegetationszeit auf 50 kg N/ha geschätzt, so ergibt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen der anhand der N-Bilanz geschätzten und der in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) gemessenen N-Mineralisation.

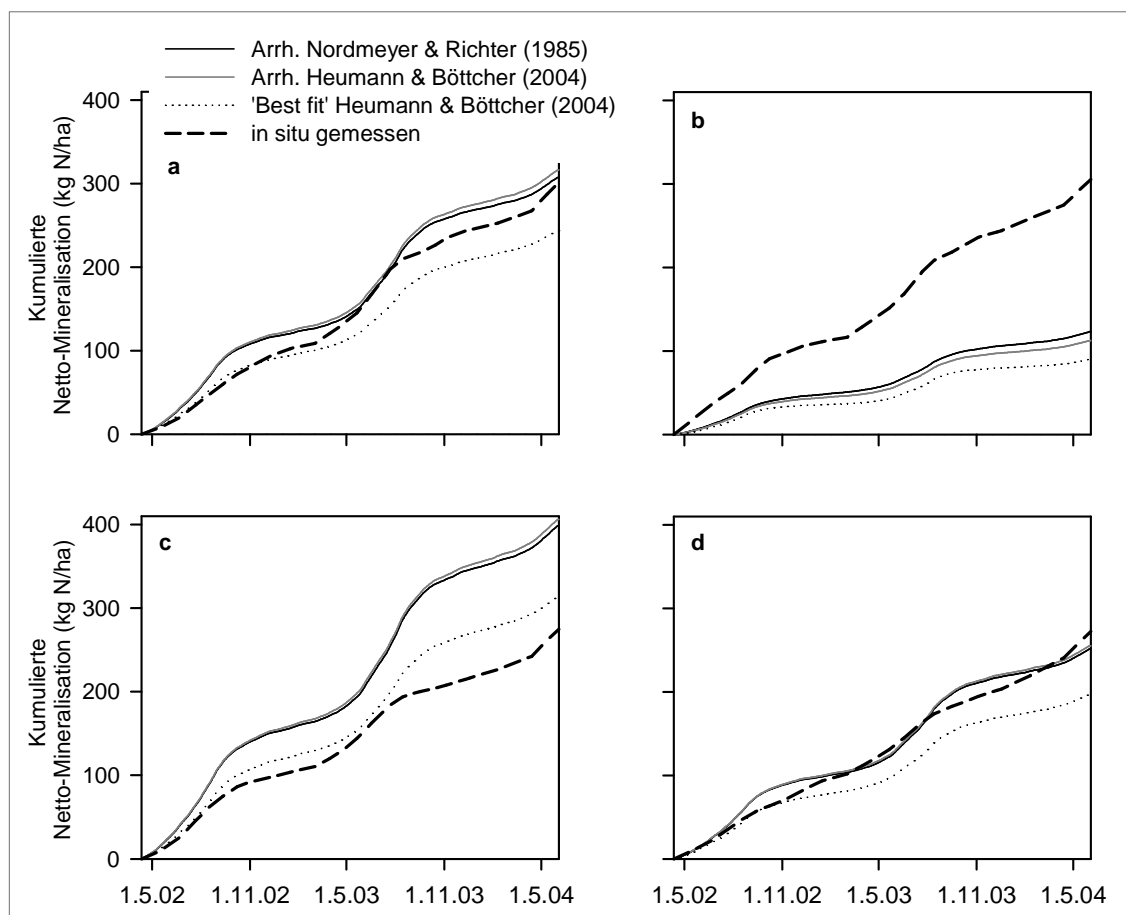


Abb. 5.6: Simulation der kumulierten N-Nettomineralisation der Substratgemische FK 02 (a), PM 02 (b) und CK (c) sowie der Kontrolle (d) unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld vom 1.4.2002 - 3.6.2004 mit Hilfe der nach Nordmeyer & Richter (1985) und Heumann & Böttcher (2004) ermittelten Parameterschätzwerte (vgl. Abb. 5.1, Tab. 5.3). Im Vergleich dazu ist die im Fuhrberger Feld im gleichen Zeitraum in situ in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) gemessene N-Mineralisation dargestellt.

Tab. 5.6: Stickstoffbilanz (kg N/ha) im Feldversuch (FV 02-04) im 2. Standjahr (2003); Mittelwerte über Wasserstufen

N-Bilanz		FK 02	PM 02	CK	Kontrolle
Input	N _{min} -Gehalt (0-90 cm) Mitte März	27.3	27.3	33.8	27.4
	N-Düngung nach Ernte	140	140	140	140
	N-Akkumulation in Kronen (Beginn)	39.1	45.0	47.2	41.5
	Summe	206.4	212.3	221.0	208.9
Output	N-Akkumulation im Aufwuchs	90.0	109.4	80.5	90.9
	N-Akkumulation in Kronen 2003	81.3	88.2	81.4	81.8
	N-Entzug durch Erntegut	12.7	12.6	12.9	12.1
	N _{min} -Rest (0-90 cm) Anfang Oktober	70.4	72.7	68.8	59.2
Summe	254.4	282.9	243.6	244.0	
Saldo Input-Output		-48	-70.6	-22.6	-35.1
Geschätzte Verluste (Vegetationszeit)		-50	-50	-50	-50
Netto-Mineralisation Mitte März bis Anfang Okt. (= (Saldo Input – Output) + geschätzte Verluste)		98	120.6	72.6	85.1
im Vergleich:	in situ gemessen, Runge (1970)	112.1	106.1	89.9	82.9
	berechnet, in-vitro-Daten, ‚Best fit‘-Modell von Heumann & Böttcher (2004)	92.5	38.8	120.3	76.0

5.4 Diskussion

Die zunehmende Verwendung von Komposten im deutschen Spargelanbau erfordert eine detaillierte Untersuchung von dessen N-Düngewirkung. Diese wurde anhand von Langzeit-Klimakammerinkubationen durchgeführt, wobei die Mineralisationsparameter eines Zwei- und Ein-Pool-Modells bei 10 und 20 °C für Substratgemische aus typischem Spargelboden und Grüngut-Fertigkompost, Champost bzw. Pferdemist bei einer C-Fracht von je 4000 kg C/ha bestimmt wurden. Dabei wurde der Einfluss von Rottegrad und C/N-Verhältnis der organischen Dünger auf deren N-Freisetzung untersucht. Anschließend wurde die N-Mineralisation unter den Temperaturbedingungen im Fuhrberger Feld vom 11.4.02 – 3.6.04 mit den in vitro gewonnenen Daten simuliert.

5.4.1 Einfluss des C/N-Verhältnisses und Rottegrades organischer Dünger auf deren Mineralisationspotenzial und -geschwindigkeit

Unterschiede in der Dynamik der N-Freisetzung aus organischen Düngern können u. a. mit der interaktiven Wirkung zwischen dem Rottegrad und dem C/N-Verhältnis der organischen Dünger erklärt werden. Grundsätzlich gilt, dass der Abbau organischer Substanz durch ein enges C/N-Verhältnis gefördert wird (Olf et al., 1990). Wird leicht zersetzbare organisches Material mit weitem C/N-Verhältnis (> 15, Roßbach (2000)) dem Boden zugeführt, so kann es durch die mikrobielle Nutzung des mineralisierten N zum Aufbau zelleigener Stoffe zu einer N-Immobilisierung im Boden kommen. Auch in den vorliegenden Untersuchungen wurde der N_{fast} -Pool durch ein enges C/N-Verhältnis erhöht. Darüber hinaus nahm der Temperatureinfluss auf die Mineralisationsgeschwindigkeit bei $T \rightarrow \infty$ mit zunehmendem C/N-Verhältnis ab. Dies kann zum einen auf die Abnahme der N_{fast} -Poolgröße zurückgeführt werden, dessen k_{fast} bei höheren Temperaturen (35 °C) stärker zunimmt als k_{slow} , welches nach Untersuchungen von Heumann & Böttcher (2004) schon bei < 35 °C sein Optimum hat. Zum anderen wurde die Mineralisationsgeschwindigkeit der PM 02-Variante aufgrund der ausgeprägten N-Immobilisierung kaum von der Temperatur beeinflusst.

Die Poolgröße N_{slow} wies im vorliegendem Versuch bei keinem Modell eine Abhängigkeit vom C/N-Verhältnis oder Rottegrad der organischen Dünger auf. Sie ist sehr stark vom Bodentyp abhängig und kann mit Hilfe von Pedotransferfunktionen aus einfach zu ermittelnden Boden- und Standorteigenschaften wie u. a.

dem C_{org} - und N_{t} -Gehalt des Bodens bestimmt werden (Heumann et al., 2003). Der bei gütegesicherten Komposten in Deutschland deklarierte Rottegrad befindet sich auf einer Skala von 1 (Kompostrohstoff) bis 5 (Fertigkompost, vollständig verrottet) (Anonym, 1999b) und ist ein Maß für die biologische Aktivität eines Materials, charakterisiert durch die Höhe der Selbsterhitzung bzw. Atmung (Jourdan, 1988). Dabei wird davon ausgegangen, dass mit fortschreitender Rotte ein Abbau der organischen sowie eine Überführung in stabilere Verbindungen erfolgt, wodurch die Masse an umsetzbarer Organik und damit auch die mikrobielle Aktivität abnimmt (Gallenkemper et al., 2000).

In dem vorliegenden Versuch nahm der Gehalt an biologisch abbaubarer organischer Substanz bzw. das Mineralisationspotenzial ($N_{\text{one-pool}}$ in % N_{org} -Fracht bzw. $F + S$) beim Ein-Pool-Modell insgesamt mit zunehmendem Rottegrad ab. Beim Zwei-Pool-Modellansatz konnte dies nur bei Verwendung des Arrhenius-Modells nach Heumann & Böttcher (2004) belegt werden. Der Gehalt an schwer abbaubarer organischer Substanz (S) zeigte in allen Zwei-Pool-Modellen eine lineare Abnahme mit dem Rottegrad der organischen Dünger. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Schwankungsbreite von S und $S + F$ in Abhängigkeit von den Modellansätzen bei der PM 02-Variante im Vergleich zu den anderen relativ groß war. Die Summe $S + F$ war im ‚Best fit‘-Modell von Heumann & Böttcher (2004) mit 3.7 % N_{org} des Pferdemistes sehr niedrig und in deren Arrhenius-Modell mit 75.1 % N_{org} relativ hoch. Es ist anzunehmen, dass die Schätzung des Parameters N_{slow} bei der PM 02-Variante aufgrund des nicht-exponentiellen Verlaufs der kumulierten N-Mineralisation zu diesen Differenzen führte. N_{slow} wurde im Arrhenius-Modell von Nordmeyer & Richter (1985) und dem ‚Best fit‘-Modell von Heumann & Böttcher (2004) vermutlich unterschätzt. Dass der Rottegrad der organischen Dünger neben dem Mineralisationspotenzial auch die -geschwindigkeit beeinflusst, die im untersuchten Temperaturbereich mit zunehmendem Rottegrad anstieg, ging auch aus Untersuchungen von Kögel-Knabner et al. (2000) hervor. Ursache hierfür ist die stärkere N-Immobilisierung durch unreife organische Dünger, die die Nettomineralisation reduziert. Der geringer als bei der Kontrolle eingeschätzte N_{slow} -Pool der FK 02-Variante weist auf eine Inkorporierung von N aus dem N_{slow} -Pool des FK 02-Substrats in der größten N-Fraktion der organischen Bodensubstanz, die weder kurz- noch mittelfristig an den Umsetzungsvorgängen im Boden beteiligt ist, hin. Die fortge-

schrittene Mineralisierung beim Fertigkompost lässt eine Immobilisierung durch weitere Abbauvorgänge im Boden ausschließen, wofür auch das enge C/N-Verhältnis von 15 spricht. Der niedrige Rottegrad des Pferdemistes verstärkte die ohnehin durch das hohe C/N-Verhältnis vorhandene Neigung zur N-Immobilisierung von schnell mineralisierbarem N aus dem N_{fast} -Pool. Der Champost nahm mit der Kombination aus engem C/N-Verhältnis und dem Rottegrad eines Frischkompostes zwischen den Extremen Fertigkompost und Pferdemist eine Sonderstellung ein. Eine verzögerte N-Freisetzung, wie bei Inkubation mit 10 °C beobachtet, charakterisiert den Champost als Frischkompost (Steffens et al., 1996) und spricht für einen relativ hohen Gehalt an labilen C-Quellen, die das Mikroorganismenleben anregen (Kögel-Knabner et al., 2000; Stadelmann et al., 1983). Daher wurde der Champost auch entgegen der Einstufung der LUFA Hameln nicht dem Rottegrad 4 (Fertig-) sondern 3 (Frischkompost) zugeordnet.

5.4.2 Validität der ermittelten Mineralisationspotenziale

Inhomogenität der organischen Dünger

Insgesamt ist anzunehmen, dass die ermittelten Mineralisationsparameter aufgrund der variierenden Zusammensetzung der eingesetzten organischen Dünger nur eine bestimmte Art dieser Dünger beschreiben. Beim Pferdemist kann vor allem der Strohanteil, der für die N-Immobilisierung verantwortlich ist (Nordmeyer, 1985), erheblich schwanken. Auch die Nährstoffgehalte der organischen Dünger sind deutlichen Schwankungen unterlegen (Poletschny, 1992). In Untersuchungen von Roßbach (2000) ergaben sich Hinweise auf eine Zunahme des Anteils stabiler N-Verbindungen mit steigendem Grüngutanteil im Kompost. Die Kontrolle wies wider den Erwartungen einen höheren N_T -Gehalt als die FK 02- und PM 02-Varianten auf. Diese Abweichungen zeigen, dass die organischen Dünger und Substrate trotz intensiver Durchmischung ein sehr inhomogenes Material darstellten, wobei die verwendeten Mengen zu berücksichtigen sind.

Neben der Inhomogenität der organischen Dünger ergab sich im Feldversuch auch durch die Düngungstechnik eine kleinräumige Inhomogenität des Bodens. Um die daraus resultierende große Streuung der Einzelwerte bei den Runge-Proben zu reduzieren, wurden die Bodenproben ab dem Frühling `03 vor der Aufteilung in PE-Beuteln jeweils in einem Eimer durch Schütteln homogenisiert, was die Streuung der Einzelwerte jedoch nur geringfügig reduzierte.

Methodenbegrenzungen

Die Unzulänglichkeit der kumulativen Mineralisierungsfunktionen zur Parameterschätzung besteht darin, dass es häufig bei gleichen Fehlersummen stark differierende Kombinationen der Parameter k und N bietet. Als Ursache dafür ist vor allem eine zu kurze Inkubationsdauer verantwortlich (Böttcher, 2003). Böttcher (2003) empfiehlt daher, einen Inkubationszeitraum anzustreben, der eine Freisetzung des potenziell mineralisierbaren N von 90 % zulässt. Völlig sichere Parameter seien aber auch dann nicht erzielbar. Im vorliegenden Versuch war demnach der Inkubationszeitraum bei Verwendung des Zwei-Pool-Modellansatzes deutlich zu kurz bemessen. Denn nach 203 Tagen Inkubation waren bei 10 und 20 °C je nach Modell durchschnittlich 16 - 26 % bzw. 24 - 39 % der Summe der N -Pools bereits mineralisiert. Beim Ein-Pool-Modell waren die Unsicherheiten bei den Parameterschätzungen geringer, bei 10 und 20 °C waren im Mittel bereits 55 % bzw. 83 % des geschätzten Mineralisationspotenzials freigesetzt. Die PM 02-Variante lag dabei jeweils deutlich unterhalb des Durchschnitts und erschwerte die Parameterschätzungen ohnehin, da sie weder bei 10 °C noch bei 20 °C einen exponentiellen Verlauf aufwies. Beim Ein-Pool-Modell wurde daher ein zuvor geschätztes Mineralisationspotenzial der PM 02-Variante, das auch mit Literaturwerten konform ist (Baumann & Schmidt, 1987), vorgegeben. Um die Unsicherheitsspanne bei den Parameterschätzungen mit Zwei-Pool-Modellen zu reduzieren, wurde zunächst die Poolgröße N_{fast} grafisch (Nordmeyer, 1985) bei 20 °C ermittelt. Da N_{fast} aus grafischer Ableitung bei Nordmeyer (1985) um etwa 14 % höher lag als bei Schätzung mit Zwei-Pool-Modellansatz, wurde N_{fast} in den vorliegenden Untersuchungen möglicherweise überschätzt. Der N_{fast} -Pool kann auch einen Mineralisationsflush repräsentieren, hervorgerufen durch die Störung des Bodengefüges bei Herstellung der Substrate (Nordmeyer, 1985). Nach Untersuchungen von Beauchamp et al. (1986) dauert dieser aber durchschnittlich nur eine Woche. Der exponentielle Abbau der beiden N -Pools dauerte in dem vorliegenden Versuch aber bis zu 49 Tagen. Darüber hinaus wurden Parametersätze für k_{fast} und k_{slow} aus der Literatur vorgegeben. Dabei basierte das Arrhenius-Modell von Nordmeyer & Richter (1985) auf einem Zersetzungsexperiment von Zuckerrübenblatt in Lössboden. Da dem Modell ganz andere Abbauraten zugrunde liegen, ist die Übertragbarkeit auf sandigen Spargelboden fraglich. Die Modelle von Heumann & Böttcher (2004)

wurden dagegen von 137 Sandböden unterschiedlicher Topografie und historischer Landnutzung aus dem Fuhrberger Feld nördlich von Hannover ermittelt, aus dem auch der in diesem Experiment verwendete Sandboden stammte.

Trotz unterschiedlicher Böden und Behandlungen war mit den vorgegebenen Reaktionskoeffizienten in allen Zwei-Pool-Modellen für alle Substratgemische eine gleichermaßen starke Anpassung an die ermittelte kumulierte N-Nettomineralisation bei 20 °C möglich. Durch die Vorgabe einheitlicher Reaktionskoeffizienten für alle Substrate bei 20 °C konnten jedoch keine Aussagen bezüglich unterschiedlicher Mineralisationsraten der organischen Dünger und Bodensubstanz getroffen werden. Unterschiedliche Abbauraten der organischen Dünger gingen als versteckte Information in die Größe des N_{slow} -Pools ein. Bei Inkubation mit 10 °C wies die mangelnde Anpassungsfähigkeit der mit einheitlichen Reaktionskoeffizienten ermittelten N-Mineralisation an die gemessenen Werte auf unterschiedliche Reaktionskoeffizienten der organischen Dünger hin, die aber aufgrund des zu kurzen Inkubationszeitraumes nur mit Hilfe des Ein-Pool-Modellansatzes bestimmt werden konnten. Für die spätere Verwendung in einem Mineralisationsmodell ist die Annahme gleicher Abbauraten gerechtfertigt, wenn davon ausgegangen wird, dass ein Parametersatz viele unterschiedliche Eigenschaften umfassen muss, um ein Modell so einfach wie möglich zu halten. Obwohl der Inkubationszeitraum in dem vorliegenden Experiment also deutlich unterhalb der nach Böttcher (2003) anzustrebenden Inkubationsperiode lag, wurde er insgesamt als lang genug betrachtet, um Interpretationen über die N-Mineralisationskinetik der organischen Dünger zuzulassen.

Da nur ein kleiner Temperaturbereich, der den relevanten Bereich der Bodentemperatur im Sommerhalbjahr in NW-Deutschland abdeckt, untersucht wurde, ist die Gültigkeit der aufgestellten Beziehungen zwischen den mineralisationskinetischen und den Qualitätsparametern der organischen Dünger außerhalb dieses Bereichs zu prüfen. Insgesamt liefern die ermittelten Zusammenhänge zwischen den Parametern trotz geringer Qualität, da sie nur auf drei verschiedenen organischen Düngern beruhen, doch erste Anhaltspunkte für eine Ableitung der N-Mineralisation von den Qualitätsparametern organischer Dünger unabhängig von deren Ausgangsmaterial.

5.5 Schlussfolgerungen

Die mit den unterschiedlichen Modellansätzen geschätzten Poolgrößen N_{fast} und N_{slow} der Varianten lagen innerhalb der Streubreite der von Heumann et al. (2002) ermittelten Werte für sandigen Ackerboden NW-Deutschlands. Die N-Dynamik des Fertigkompost-Substrates ähnelte der aus der reinen Bodensubstanz (Kontrolle), was für Fertigkompost typisch ist und für eine weitgehende Bindung des organischen N in stabilen Huminstoffkomplexen steht (Gottschall, 1992). Das Mineralisationspotenzial des Kompostes betrug im Mittel der Modellansätze insgesamt rund 0 % N_{org} -Fracht des Kompostes. Das heißt, insgesamt erhöhte die Kompostanwendung das kurz- und mittelfristige Mineralisationspotenzial des Bodens nicht. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch andere Autoren wie Kögel-Knabner et al. (2000), Roßbach, (2000), Scherer et al. (1996), Gutser & Claassen (1994) sowie Mittmann et al. (1994). Im Vergleich dazu fand Nendel et al. (2004) in Langzeit-Laborinkubationsversuchen ein N-Nachlieferungsvermögen aus Bioabfall-Fertigkompost in Weinbergböden von 65 % des Gesamt-Stickstoffs. Dabei waren durchschnittlich 5 % schnell und 60 % langsam abbaubar. Während die schnell abbaubare N-Fraktion mit den ermittelten Daten übereinstimmt, lag die Größe des N_{slow} -Pools weit über den Ergebnissen des vorliegenden Versuches.

Bei Champost fanden auch Mittmann et al. (1994) eine verzögerte N-Freisetzung, wobei diese unter Freilandbedingungen im Anwendungsjahr 60 % des Gesamt-Stickstoffs betrug und überwiegend erst im Herbst erfolgte.

Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl der Rottegrad als auch das C/N-Verhältnis der organischen Dünger, welches aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials nicht zwangsläufig mit dem Rottegrad korrelieren muss (Gallenkemper et al., 2000), geeignet sind, um eine Prognose über das zu erwartende N-Nachlieferungsverhalten organischer Dünger unabhängig von deren Ausgangsmaterial zu liefern. Die Verwendung der gleichen Arrheniusfunktionen bzw. der gleichen Reaktionskoeffizienten für verschiedene N-Pools und Böden, wie es häufig in Modellen der Fall ist, muss in Frage gestellt werden. Da das Temperaturoptimum der N-Mineralisation von dem jeweiligen Temperaturoptimum der Mikroorganismenpopulationen im Boden abhängig ist (Stadelmann et al., 1983), muss berücksichtigt werden, dass organische Dünger u. a. in Abhängigkeit von ihrem Rottegrad und C/N-Verhältnis die Mikro-

organismenpopulationen unterschiedlich beeinflussen und somit den Temperatureinfluss auf die Mineralisationsdynamik verändern. Im niedrigen Temperaturbereich (10 °C) scheint der Einfluss der organischen Dünger auf die N-Mineralisation nach den vorliegenden Ergebnissen von untergeordneter Rolle zu sein, da die N-Mineralisation innerhalb einer relativ geringen Streubreite lag.

Insgesamt waren die *in vitro* gewonnenen Daten auch geeignet, um die N-Mineralisation unter Feldbedingungen zu simulieren, was die relativ gute Übereinstimmung mit der *in situ* gemessenen N-Mineralisation zeigte.

6 Abschließende Betrachtung

Spargel gehört als perennierende Pflanze zu den weniger untersuchten Kulturen, denn die Spargelforschung zeichnet sich durch langjährige und aufwändige Untersuchungen aus. Darüber hinaus weisen Spargelpflanzen eine große Inhomogenität auf (Sinton & Wilson, 1999), die einen großen Versuchsumfang erfordert, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten (Aldenhoff, 2005). In den vorliegenden Untersuchungen wurde dem, soweit es die Kapazitäten an Arbeitskräften und finanziellen Mitteln zuließen, Rechnung getragen.

Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden alle Feld- und Gefäßversuche mit dem gleichen typischen Spargelboden (humoser Sand) aus dem Fuhrberger Feld bei Hannover, der auch zum Anbau von Spargel genutzt wird, durchgeführt. Die Einflüsse von Wasserversorgung und organischer Düngung auf das Wachstum und den Ertrag von Spargel wurden in zwei Jahren mit extremen Witterungsverläufen untersucht. Während das erste Untersuchungsjahr (2002) relativ niederschlagsreich und kühl war, zeichnete sich das zweite (2003) durch anhaltende Trockenheit bei hohen Temperaturen aus. Dies führte im FV 02-04 dazu, dass im ersten Jahr kaum Bewässerungsbedarf bestand und im zweiten Jahr Probleme mit der Nährstoffversorgung auftraten. Die ermittelten Wassereffekte bei Spargel resultierten somit in allen Versuchen aus Behandlungen während einer Vegetationsperiode. Für die Bewertung der Ergebnisse von FV 02-04 ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass sich aus der Versuchsdurchführung in der Ertragsanlage eines Spargelbetriebes Einschränkungen u. a. bezüglich der Anzahl an Pflanzenproben ergaben. Den Ansprüchen (Pflege der Anlage, Erntezeiten etc.) des Betriebes, der die Versuchsfläche zur Verfügung, war Rechnung zu tragen.

Insgesamt konnten kaum Wassereffekte bei Spargel nachgewiesen werden. Die positiven Einflüsse der hohen Bewässerungsstufe auf den Spargelertrag im FV 02-04 deuteten aber darauf hin, dass eine Wasserversorgung nahe der Feldkapazität zur Maximierung des Ertrages erforderlich ist, wie es auch Wilcox (1985) und Wilcox-Lee & Drost (1990) empfehlen. Die höchste WUE wurde aber erzielt, als der maximale Ertrag pro Flächeneinheit noch nicht erreicht war, wie es im Allgemeinen auch zu erwarten ist (Bos, 1980).

Die Erwartungen an eine positive Beeinflussung der WUE der Spargelpflanzen durch Unterflur-Tropfbewässerung aufgrund geringerer Evaporationsverluste

gegenüber der Überflur-Tropfbewässerung wurden nicht erfüllt. Die WUE der Spargelpflanzen unterschied sich in Abhängigkeit vom Applikationsort des Wassers nicht, da u. a. das Wachstum der unterflurig bewässerten Pflanzen gegenüber den überflurig bewässerten beeinträchtigt war. Die Ursachen für die Wachstumsbeeinträchtigungen konnten dabei nicht eindeutig ermittelt werden. Es ist aber anzunehmen, dass Sauerstoffmangel des Rhizoms bei Bewässerung auf Rhizomebene bzw. Wassermangel des Rhizoms bei Bewässerung in 40 cm Bodentiefe eine Rolle spielten. Vergleichbare Untersuchungen zum Einfluss der Unterflur-Tropfbewässerung auf das Wachstum von Spargel wurden bislang nicht vorgenommen. Um die Ursachen für die aufgetretenen Effekte abschließend zu klären, besteht daher noch Forschungsbedarf.

Von der Unterflur-Tropfbewässerung ausgehende negative Einflüsse auf das Wachstum von Spargel konnten auch im FV 02-04 nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere bei der hohen Bewässerungsstufe könnte dadurch das Ertragspotenzial vermindert worden sein. Aufgrund der Ergebnisse aus GV 04 wird empfohlen, die Überflur- der Unterflur-Tropfbewässerung vorzuziehen. Bezüglich der Applikationsverluste bieten Überflur- und Unterflur-Tropfbewässerungssysteme gegenüber Überkopfbewässerungssystemen die gleichen Vorteile, wobei höhere Evaporationsverluste bei Überflur- gegenüber Unterflur-Tropfbewässerung zu erwarten sind, auch wenn dies im GV 04 nicht gezeigt werden konnte. Als Nachteil von Überflur- gegenüber Unterflur-Tropfbewässerungssystemen ist u. a. die aufgrund der Pflegearbeiten in Spargelanlagen erforderliche jährliche Neuinstallation zu bewerten, dem gegenüber steht aber u. a. eine bessere Kontrolle der Funktionsfähigkeit und Wartung der Anlage.

Die in der BioAbfV (Anonym, 1998) vorgegebenen maximalen Aufwandmengen für Komposte betragen in Abhängigkeit von den Schwermetallgehalten 20 bzw. 30 t Trockensubstanz pro Hektar in drei Jahren. Bei einem durchschnittlichen TS-Gehalt in Komposten von ca. 60 % (Eurich-Menden & Döhler, 2000) entspricht dies einer Frischmasse von ca. 500 dt/ha. Zur Humusversorgung im Spargelanbau empfiehlt Komnik (1994) zur Flächenvorbereitung 1000 dt/ha Grünkompost auszubringen, was die gesetzlich maximal zulässigen Höchstmengen zur Neupflanzung überschreitet und eine Anreicherung und Verlagerung von Nitrat zur Folge haben kann. Jährliche Humusgaben lassen sich aufgrund der veränderten Anbauverfahren, insbesondere wegen des Verzichts auf

das Abdämmen nach der Ernte, aber nur schwer in das Anbauverfahren integrieren. Unter Berücksichtigung der Düngeverordnung (Anonym, 1996) wird die Aufwandmenge für Komposte in aller Regel durch deren relativ hohen Gehalt an pflanzenverfügbarem Kalium (Gottschall & Stöppler-Zimmer, 1993) und Phosphat (Poletschny, 1992) begrenzt. Die P- und K-Gehalte waren im FV 02-04 und den Gefäßversuchen im Vergleich zum Pferdemist und Champost relativ niedrig. Der verwendete Champost zeichnete sich bei gleicher C-Fracht gegenüber den anderen organischen Düngern durch relativ hohe P- und K-Frachten aus.

Bei einem Ausbringungskriterium der organischen Dünger von 4000 kg C/ha wie im FV 02-04, GV 02, GV 03 und Klika 02 war die Aufwandmenge des Fertigkompostes im Vergleich zu den anderen organischen Düngern jeweils am höchsten und betrug ca. 26 bzw. 33 t Trockensubstanz pro Hektar und 44 bzw. 47 t Frischmasse pro Hektar, was im Bereich der zulässigen Höchstmenge für Komposte bei Ausbringung im dreijährigen Turnus liegt.

Bei dieser Aufwandmenge konnten in den Gefäßversuchen bereits positive Einflüsse des Fertigkomposteinsatzes auf das Wachstum von Spargel gegenüber den anderen organischen Düngern Pferdemist und Champost nachgewiesen und die WUE der Spargelpflanzen gesteigert werden. Die Ursache für das bessere Abschneiden des Fertigkompostes konnte jedoch nicht abschließend geklärt werden. Neben höheren Wasserkapazitäten und Humusgehalten gegenüber den anderen organischen Düngern, die aber nicht nachgewiesen werden konnten, können u. a. auch eine vorübergehende N-Immobilisierung des Pferdemistes sowie phytotoxische Substanzen im Champost zu Wachstumsbeeinträchtigungen gegenüber den Fertigkompost-Varianten geführt haben. Veränderungen des Humusgehaltes verlaufen im Boden grundsätzlich sehr langsam ab und betreffen fast ausschließlich den leicht umsetzbaren Anteil (Körschens et al., 1998). Nach Untersuchungen von Körschens et al. (1998) betragen die jährlichen Veränderungen im C_{org} -Gehalt selbst bei extremem Wechsel der Düngung nur ca. 0.01 % C_{org} bzw. 500 kg/ha.

Insgesamt wirkte sich organische Düngung positiv auf den Ertrag aus, wobei Ertragssteigerungen je nach Standort neben Wassereffekten auch auf pH- und Nährstoffeffekten der organischen Düngung beruhen konnten.

Komposte unterscheiden sich in Abhängigkeit von Ausgangsmaterial (Grünschnitt, Bioabfälle) und Rottegrad (Frisch- oder Fertigkompost) in ihren Nährstofffrachten (Poletschny, 1992) und -verfügbarkeiten. Da der Anteil an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Fertigkompost im Anwendungsjahr relativ gering ist, wie im Klika 02 und anderen Untersuchungen (Kögel-Knabner et al., 2000; Roßbach, 2000; Scherer et al., 1996; Gutser & Claassen (1994); Mittmann et al., 1994) gezeigt werden konnte, können Fertigkomposte nur in begrenztem Umfang zur Stickstoffversorgung der Pflanzen beitragen. Im Gegensatz zu Frischkomposten neigen Fertigkomposte nicht zur N-Immobilisierung (Steffens et al., 1996) und sind frei von phytotoxischen Substanzen. Frischkomposte verfügen im Vergleich zu Fertigkomposten über niedrigere Gehalte an Gesamtnährstoffen und verfügbaren Nährstoffen.

Im Klika 02 konnte gezeigt werden, dass sowohl der Rottegrad als auch das C/N-Verhältnis der organischen Dünger, welches aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials nicht zwangsläufig mit dem Rottegrad korrelieren muss (Gallenkemper et al., 2000), geeignet sind, um eine Prognose über das zu erwartende N-Nachlieferungspotenzial organischer Dünger unabhängig von deren Ausgangsmaterial zu liefern. Die geschätzten Mineralisationsparameter der Zwei-Pool-Modellansätze können genutzt werden, um in Modellen wie ‚HERMES‘ (Kersebaum, 1989) die unterschiedlichen Mineralisationsdynamiken organischer Dünger zu berücksichtigen und die Effizienz des mineralischen N-Einsatzes zu erhöhen.

Die im Klika 02 unter kontrollierten Bedingungen ermittelten Differenzen bei der kumulierten N-Mineralisation der organischen Dünger sind relativ gering, so dass sie unter Freilandbedingungen nur schwer nachzuweisen sind. Evaluierungen unter Freilandbedingungen im FV 02-04 wurden mit N-Mineralisationsbestimmungen in Anlehnung an die Methode von Runge (1970) mit Hilfe von Inkubationsversuchen in situ vorgenommen. Unterschiede bezüglich der N-Freisetzung aus den organischen Düngern konnten nicht nachgewiesen werden, was u. a. auf eine starke Streuung der Einzelwerte und die verwendete Methode zurück zu führen ist. Darüber hinaus konnten unter Feldbedingungen während des Untersuchungszeitraumes von zwei Jahren insgesamt auch keine Einflüsse der organischen Dünger auf die N_{\min} -Gehalte in Spargelreihe und Zwischenreihenbereich nachgewiesen werden.

Insgesamt konnte das Ziel, die WUE von Spargel bei gleichzeitiger Sicherung des Ertragsniveaus durch organische Düngung zu erhöhen, durch den Einsatz von Fertigkompost erreicht werden, wobei dies aber nur unter kontrollierten Wasser- und Nährstoffbedingungen in Gefäßversuchen nachgewiesen werden konnte. Aufgrund der langsamen Stickstoffflüsse aus Fertigkompost, die pflanzenbaulich gut nutzbar sind, und relativ geringer Nährstoffgehalte gegenüber den anderen verwendeten organischen Düngern ist neben der Erhöhung der WUE auch eine Verminderung des Risikos des Nitrateintrages ins Grundwasser und somit eine Verbesserung der NUE des Spargels durch den Einsatz von gütegesichertem Fertigkompost als organischer Düngung im Vergleich zu Pferdemist und Champost zu erwarten. Um eine Maximierung des Ertrages sicherzustellen, reicht eine Wasserversorgung von 50 % nFK nicht aus, wobei diese gegenüber höheren Wasserstufen aber eine hohe WUE erreicht. Die Frage nach dem optimalen Tropfbewässerungssystem für Spargel konnte nicht abschließend geklärt werden. Klar ist aber, dass sowohl Unterflur- als auch Überflur-Tropfbewässerungssysteme ihre Vor- und Nachteile in der Handhabung aufweisen, die es individuell abzuwägen gilt.

7 Literaturverzeichnis

- Aldenhoff, L. (2005): Einfluss der Jungpflanzenqualität auf die Etablierung von Spargelanlagen. Dissertation, Humboldt-Universität.
- Anonym (1991): "Methodenbuch 1 - Die Untersuchung von Böden," VDLUFA-Selbstverlag, Darmstadt.
- Anonym (1992): Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 21. April 1992. Bundesgesetzblatt I, 912-916.
- Anonym (1994): Methodenbuch zur Analyse von Kompost. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., St. Augustin.
- Anonym (1996): Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüngeVO) vom 26. Januar 1996. Bundesgesetzblatt I, 118-121.
- Anonym (1997): Qualitätsnormen und Handelsklassen für Gartenbauerzeugnisse und Kartoffeln. Verlag E. Appelhans, Salzgitter.
- Anonym (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) vom 21. September 1998. Bundesgesetzblatt I, 2995.
- Anonym (1999a): Champignon-Kompost bei Spargel einsetzen. Gemüse **35**, 668.
- Anonym (1999b): Kompost Gütesicherung RAL-GZ 251. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V./Ed. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., St. Augustin (www.bgkev.de).
- Anonym (2001a): Ratschläge für den Spargelanbau. Vereinigung der Spargelanbauer in Niedersachsen e.V., Die Spargelanbauer in Westfalen-Lippe e.V./Ed. Asparagus Handels- und Vertriebs GmbH, Hoya.
- Anonym (2001b): Wasser wird weltweit knapper. Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (DSW), Hannover, www.dsw-online.de, Abrufdatum: 21.05.07.
- Bachmann, J. & Zhang, H. (1991): Die Stabilität von Sandböden in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz und deren Humifizierungsgrad. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. **154**, 47-52.
- Bai, Y. & Kelly, J. F. (1999): A study of photosynthetic activities of eight asparagus genotypes under field conditions. J. Amer. Soc. Hort. Sci. **124**, 61-66.
- Battilani, A. (1997): Response of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) to post-harvesting irrigation. Acta horticulturae **449**, 181 - 186.
- Baumann, E. & Schmidt, R. (1987): Untersuchungen zum Abbauverhalten organischer Düngestoffe. Arch. Gartenbau **35**, 105-114.
- Bazzaz, F. A. (1979): The physiological ecology of plant succession. Ann. Rev. Ecol. Syst. **10**, 351-371.

- Beauchamp, E. G., Reynolds, W. D., Brasche-Villeneuve, D. & Kirby, K. (1986): Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatment and cropping histories. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **50**, 1478-1483.
- Becher, H. H. (1996): Einfluss organischer Düngungen auf bodenphysikalische Parameter. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **159**, 121-127.
- Beck, T. (1983): Die N-Mineralisierung von Böden im Laborbrutversuch. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **146**, 243-252.
- Behr, H.-C. (2001): Kleine Marktstudie: Spargel. *Gemüse* **37**, 55-58.
- Behrendt, S. (2002): Kleine Marktstudie Spargel. *Gemüse* **38**, 55-58.
- Benson, B. L. (1999): World asparagus production areas and periods of production. *Acta Horticulturae* **479**, 43-50.
- Benson, B. L. (2002): Update of the world's asparagus production areas, spear utilization and production periods. *Acta Horticulturae* **589**, 33-40.
- Benson, B. L. & Takatori, F. H. (1980): Partitioning of dry matter in an open-pollinated and F1 hybrid cultivars of asparagus. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **105**, 567-570.
- Billau, W. (1986): Untersuchungen über Lokalisation und Ausmaß der Lignifizierung in Pflanzen von *Asparagus officinalis* L. unter Berücksichtigung von Sorte, modifizierenden Umweltfaktoren und phenolischen Inhaltsstoffen. Dissertation, Universität Hohenheim.
- Bischoff, R. (1987): Auswirkungen langjähriger differenzierter organischer Düngung auf Ertrag und Bodenparameter. *VDLUFA-Schriftenreihe* **23**, 451-466.
- Bloom, P. (2003): Einfluss von Komposten auf Stickstoffdynamik und -haushalt, Wachstum und Ertrag von Spargel (*Asparagus officinalis* L.). Dissertation, Universität Hannover.
- Bohne, H., Daum, T. & Schuh, C. (1996): Einfluss von Biokompost und Stallmist auf Bodeneigenschaften und Wachstum von *Acer pseudo-platanus*. *Gartenbauwissenschaft* **61**, 53-59.
- Boogaard, R. v. d., Goubitz, S., Veneklaas, E. J. & Lambers, H. (1996): Carbon and nitrogen economy of four *Triticum aestivum* cultivars differing in relative growth rate and water use efficiency. *Plant, Cell and Environment* **19**, 998-1004.
- Bos, M. G. (1980): Irrigation efficiencies at crop production level. *ICID Bulletin* **29**, 18-25, 60.
- Böttcher, J. (2003): Unsicherheiten bei der Ermittlung von Mineralisierungsparametern mit nicht-linearen Verfahren. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **102**, 267.
- Bucks, D. A. & Davis, S. (1986): Historical development. In: *Trickle irrigation for crop production*, 1 - 26. Elsevier, Phoenix.
- Cannell, G. H. & Takatori, F. H. (1970): Irrigation-nitrogen studies in asparagus and measurement of soil moisture changes by the neutron method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **34**, 501-506.

- Daningsih, E., Woolley, D. J. & Nichols, M. A. (2004): Changes in morpho-physiology of *Asparagus officinalis* L. at different electrical conductivities. *Acta horticulturae* **644**, 385-391.
- Dasberg, S. & Or, D. (1999): *Applied Agriculture: Drip Irrigation*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York/Ed.
- Downton, W. J. S. & Törökfalvy, E. (1975): Photosynthesis in developing asparagus plants. *Aust. J. Plant Physiol.* **2**, 367-375.
- Drost, D. & Wilson, D. (2002): Estimating root length density and biomass in asparagus. *Acta Horticulturae* **589**, 287-295.
- Drost, D. T. (1996): Irrigation budget and plant growth of asparagus. *Acta Horticulturae* **415**, 343-350.
- Drost, D. T. (1999a): Irrigation effects on asparagus root distribution. *Acta Horticulturae* **479**, 283-288.
- Drost, D. T. (1999b): Soil water deficits reduce growth and yield of asparagus. *Acta Horticulturae* **479**, 383-390.
- Drost, D. T. & Wilcox-Lee, D. (1990): Effect of soil matric potential on growth and physiological responses of greenhouse grown asparagus. *Acta Horticulturae* **271**, 467-476.
- Drost, D. T. & Wilcox-Lee, D. (1997a): Soil water deficits and asparagus: I. Shoot, root, and bud growth during two seasons. *Scientia Horticulturae* **70**, 131-143.
- Drost, D. T. & Wilcox-Lee, D. (1997b): Soil water deficits and asparagus: II. Bud size and subsequent spear growth. *Scientia Horticulturae* **70**, 145-153.
- Duynisveld, W. H. M. & Strebel, O. (1990): Einfluss von Standorteigenschaften und Bodennutzung auf die Nitrat Auswaschung aus dem Wurzelraum. In: *Veröffentlichungen des Inst. für Siedlungswasserwirtschaft*, 48, 205-223, Braunschweig.
- Eberhard, J. & Maync, A. (1999): Unterflur-Tropfbewässerung im Freiland - Erste Erfahrungen. *Monatsschrift* **87**, 32-34.
- Ebertseder, T., Gutser, R. & Claassen, N. (1997): Bioabfallkompost - Qualität und Anwendung in der Landwirtschaft. In: *Bioabfallkompostierung - Verfahren und Verwertung*, Schriftenreihe 139, 133-256, München.
- Eurich-Menden, B. & Döhler, H. (2000): Datenbank organische/mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger. *KA-Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* **47**, 854-856.
- Faville, M. J., Green, T. G. A. & Silvester, W. A. (1999a): Cladophyll characteristics as possible contributors to genetic variation in asparagus fern photosynthetic capacity. *Acta Horticulturae* **479**, 85-89.
- Faville, M. J., Silvester, W. B., Green, T. G. A. & Jermyn, W. A. (1999b): Photosynthetic characteristics of three asparagus cultivars differing in yield. *Crop Science* **39**, 1070-1077.

- Faville, M. J., Silvester, W. B., Green, T. G. A. & Jermyn, W. A. (1999c): Photosynthetic characteristics of three asparagus cultivars differing in yield. *Crop Science* **39**, 1070-1077.
- Finnern, H., Grottenthaler, W., Kühn, D., Pälchen, W., Schraps, W. & Sponagel, H. (1994): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Gallenkemper, B., Becker, G. & Kötter, A. (2000): Bewertungskriterien für Qualität und Rottestadium von Bioabfallkompost unter Berücksichtigung der verschiedenen Anwendungsbereiche. In: *Neue Techniken der Kompostierung Teilvorhaben 7.1 Bewertungskriterien für das Rottestadium von Bioabfallkomposten*, I. Umweltbundesamt, Berlin.
- Geissler, T. (1981): Zur Nährstoffversorgung von Spargel durch Mineraldüngung. *Arch. Gartenbau* **29**, 149-157.
- Giusquiani, P. L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D. & Benetti, A. (1995): Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *J. Environ. Qual.* **24**, 175-182.
- Gottschall, R. (1992): *Kompostierung. Optimale Aufbereitung und Verwendung organischer Materialien im ökologischen Landbau*. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe.
- Gottschall, R. & Stöppler-Zimmer, H. (1993): Qualitätssicherung und anwendungsorientierte Produktdiversifizierung bei Bio- und Grünkomposten. In: *Biologische Abfallbehandlung*, I, 131-158. Baeza Verlag, Witzenhausen.
- Guo, J., Jermyn, W. & Turnbull, H. (2001): Carbon metabolism in developing spears of two asparagus (*Asparagus officinalis*) cultivars with contrasting yield. *Aust. J. Plant Physiol.* **28**, 1013-1021.
- Guo, J., Jermyn, W. & Turnbull, H. (2002a): Carbon partitioning and sucrose metabolism in two field-grown asparagus (*Asparagus officinalis*) cultivars with contrasting yield. *Functional plant biology* **29**, 517-526.
- Guo, J., Jermyn, W. A. & Turnball, M. H. (2002b): Carbon assimilation, partitioning and export in mature cladophylls of two asparagus (*Asparagus officinalis*) cultivars with contrasting yield. *Physiologia Plantarum* **115**, 362-369.
- Guo, J., Jermyn, W. A. & Turnball, M. H. (2002c): Diurnal and seasonal photosynthesis in two asparagus cultivars with contrasting yield. *Crop Science* **42**, 399 - 405.
- Gurrath, P. (2002): Entwicklung des Gemüsebaus in Deutschland im letzten Jahrzehnt. In: *Wirtschaft und Statistik*, **4**, 247-254, Wiesbaden.
- Gutser, R. & Claassen, N. (1994): Langzeitversuche zum N-Umsatz von Wirtschaftsdüngern und kommunalen Komposten. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **73**, 47-50.
- Gutser, R. & Ebertseder, T. (2002): Grundlagen zur Nährstoff- und Sonderwirkung sowie zu optimalen Einsatzstrategien von Komposten im Freiland. In: *Handbuch Kompost im Gartenbau*, 47-72. Förderungsges. Gartenbau e.V., Bonn.

- Hartmann, H. D. (1981): Die Bewässerung bei Spargel und ihre Auswirkung auf die Pflanze. Arch. Gartenbau **20**, 167-175.
- Hartmann, H. D. (1988): Die mineralische Düngung von Spargel. Gemüse **24**, 228-231.
- Hartmann, H. D. (1989): Spargel - Grundlagen für den Anbau. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Hartmann, H. D. (1994): Mangelkrankheiten an Spargel. Gemüse **30**, 548-549.
- Hartmann, H. D. & Hermann, G. (1986): Die Bedeutung der Humusversorgung beim Anbau von Spargel. Landw. Forschung **39**, 61-67.
- Heumann, S. & Böttcher, J. (2004): Temperature functions of the rate coefficients of net N mineralization in sandy arable soils, Part I. Derivation from laboratory incubations. J. Plant Nutr. Soil Sci. **167**, 381-389.
- Heumann, S., Böttcher, J. & Springob, G. (2003): Pedotransfer functions for the pool size of slowly mineralizable organic N in sandy arable soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. **166**, 308-318.
- Heumann, S., Böttcher, J. & Springop, G. (2002): N mineralization parameters of sandy arable soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. **165**, 441-450.
- Hills, M. J. (1986): Photosynthetic characteristics of mesophyll cells isolated from cladophylls of *Asparagus officinalis* L. Planta **169**, 38-45.
- Hirsch, C. (1985): Die N-Ernährung des Spargels (*Asparagus officinalis* L.). Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Howell, T. A. (2001): Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. Agronomy Journal **93**, 281-289.
- Inagaki, N., Tsuda, K., Maekawa, S. & Terabun, M. (1989): Effects of light intensity, CO₂ concentration, and temperature on photosynthesis of *Asparagus officinalis* L. J. Jap. Soc. Hort. Sci. **58**, 369-376.
- Jourdan, B. (1988): Zur Kennzeichnung des Rottegrades von Müll- und Müllklärschlammkomposten. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Karno & Woolley, D. J. (2002): Studies on remobilization of fructans from asparagus roots during harvest using carbon-14 and high performance liquid chromatography. Acta Horticulturae **589**, 273-279.
- Kasten, P. (2001): Was bringt der Komposteinsatz? Landwirtschaftszeitung LZ, 37-39.
- Kaufmann, F., Pinkau, H. & Biesel, H. (1977): Zum Einsatz von Industriehumusstoffen bei Grünspargel. Arch. Gartenbau **25**, 323-335.
- Kersebaum, K. C. (1989): Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden. Dissertation, Universität Hannover.
- Kögel-Knabner, I., Leifeld, J. & Siebert, S. (2000): Humifizierungsprozesse von Kompost nach der Ausbringung auf den Boden. In: Neue Techniken der Kompostierung Teilvorhaben 13 'Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen', I. Umweltbundesamt, Berlin.

- Komnik, H. G. (1994): Organische Bodenverbesserung im Spargelanbau. *Gemüse* **30**, 126-127.
- Körschens, M. (1999): Einfluss extrem hoher Stallmistgaben auf bodenchemische und bodenphysikalische Eigenschaften. *Mitt. d. Dtsch. Bdkdl. Gesell.* **91**, 811-814.
- Körschens, M., Weigel, A. & Schulz, E. (1998): Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances. Tools for evaluation sustainable productivity of soils. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **161**, 409-424.
- Krug, H. (1998): Untersuchungen zur umweltgerechten Spargelproduktion. Abschlussbericht, Institut für Gemüse- und Obstbau, Universität Hannover.
- Krug, H. (1999a): Seasonal growth and development of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) IV. Crown activity as a function of incubation temperature and temperature gradient. *Gartenbauwissenschaft* **64**, 84-88.
- Krug, H. (1999b): Seasonal growth and development of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) V. Fern "ripening" and crown activity in open fields. *Gartenbauwissenschaft* **64**, 165-172.
- Krug, H., Liebig, H.-P. & Stützel, H. (2002): "Gemüseproduktion," Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Krug, H., Schürmann, B. & Kailuweit, D. (1993): Stickstoffdüngung bei Spargel. *Gemüse* **29**, 619-620.
- Kunzelmann, G. & Paschold, P.-J. (1998): Bewertung von Bewässerungstechniken für den Spargelanbau - Teil I. *Gemüse* **34**, 417-420.
- Mamo, M., Moncrief, J. F., Rosen, C. J. & Halbach, T. R. (2000): The effect of municipal solid waste compost application on soil water and water stress in irrigated corn. *Compost Science & Utilization* **8**, 236-246.
- Martin, S. & Hartmann, H. D. (1990): The content and distribution of the carbohydrates in asparagus. *Acta horticulturae* **271**, 443-449.
- Mehwald, J. (1991a): Der große Durst des Spargels - Auf die Dosis kommt es an! *Gemüse* **27**, 518-519.
- Mehwald, J. (1991b): Für den Spargelanbauer: Humus ja, aber mit Überlegung und Sorgfalt. *Gemüse* **27**, 518.
- Mengel, K., Schneider, B. & Kosegarten, H. (1999): Nitrogen compounds extracted by electroultrafiltration (EUF) or CaCl₂ solution and their relationship to nitrogen mineralization in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **162**, 139-148.
- Mittmann, U., Weier, U. & Scharpf, H.-C. (1994): Die Stickstofffreisetzung aus organischen Düngern. *Gemüse* **30**, 104 - 105.
- Mosler, T. (2001): Tropfbewässerung bei Spargel. *Spargel & Erdbeer Profi* **2**, 28-31
- Nelson, D. & Sommers, L. (1973): Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy journal* **65**, 109-149.

- Nendel, C., Reuter, S., Kersebaum, K. C., Kubiak, R. & Nieder, R. (2005): Nitrogen mineralization from mature bio-waste compost in vine-yard soils II. Test of N-mineralization parameters in a long-term *in situ* incubation experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **168**, 219-227.
- Nendel, C., Reuter, S., Kubiak, R. & Nieder, R. (2004): Nitrogen mineralization from mature bio-waste compost in vineyard soils I. Long-term laboratory incubation experiments. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **167**, 397-407.
- Nordmeyer, H. (1985): Die Stickstoffmineralisation von Zuckerrübenblatt im Boden. Dissertation, Hannover.
- Nordmeyer, H. & Richter, J. (1985): Incubation experiments on nitrogen mineralization in loess and sandy soils. *Plant and Soil* **83**, 433-445.
- Olf, H.-W., Beck, T. & Werner, W. (1990): Charakterisierung von N-Immobilisations- und Mobilisationsprozessen durch chemische und mikrobiologische Parameter. *VDLUFA-Schriftenreihe* **32**, 257-264.
- Ozores-Hampton, M., Obreza, T. A. & Hochmuth, G. (1998): Using composted wastes on Florida vegetable crops. *HortTechnology* **8**, 130-137.
- Pardo, A., Arbizu, J. & Suso, M. L. (1996): Evapotranspiration and crop coefficients in white asparagus. *Acta horticulturae* **449**, 187-192.
- Paschold, P.-J. (1999): Geisenheimer Bewässerungssteuerung - Aktuelle Empfehlungen. *Gemüse* **35**, 88-96.
- Paschold, P.-J. (2001): N-Düngung von Spargel im ersten Standjahr. *Gemüse* **37**, 34-37.
- Paschold, P.-J., Artelt, B. & Hermann, G. (1999): Influence of catch crops on leaching, yield and quality of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Acta Horticulturae* **479**, 439-445.
- Paschold, P.-J., Hermann, G. & Artelt, B. (2000): Humuswirkung beim Spargelanbau. *Gemüse* **36**, 42.
- Poletschny, H. (1992): Kompostverwertung im Landbau aus der Sicht des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA). *VDLUFA-Schriftenreihe* **35**, 203-217.
- Poorter, H. & Evans, J. R. (1998): Photosynthetic nitrogen-use efficiency of species that differ inherently in specific leaf area. *Oecologia* **116**, 26-37.
- Richter, J. (1986): Der Boden als Reaktor - Modelle für Prozesse im Boden. Verlag Ferdinand Enke, Stuttgart.
- Roßbach, J. (2000): Einfluss von Ausgangsmaterial und Rottegrad auf N-Fractionen und N-Wirkung von Komposten. Dissertation, Universität Bonn.
- Roth, R. & Gardner, B. (1989): Asparagus yield response to water and nitrogen. *Transactions of the ASAE* **32**, 105-112.
- Roth, R. & Gardner, B. (1990): Asparagus spear size distribution and earliness as affected by water and nitrogen application. *Transactions of the ASAE* **33**, 480-468.

- Runge, M. (1970): Untersuchungen zur Bestimmung der Mineralstickstoff-Nachlieferung am Standort. *Flora* **159**, 233-257.
- Scharpf, H.-C. (2002): Was ist Kompost? In: Handbuch Kompost im Gartenbau, 9-16. Förderungsges. Gartenbau e.V., Bonn.
- Scheffer, F. & Pajenkamp, H. (1951): Phosphatbestimmung in Pflanzenaschen nach der Molybdän-Vanadin-Methode. *Z. Pflanzenern., Dgg., Bodenk.* **56**, 2.
- Scherer, H. W., Werner, W. & Neumann, A. (1996): N-Nachlieferung und N-Immobilisierung von Komposten mit unterschiedlichem Ausgangsmaterial, Rottegrad und C/N-Verhältnis. *Agribiol. Res.* **49**, 120-129.
- Schloemer, S. (1991): Denitrifikation eines gemüsebaulich genutzten Bodens in Abhängigkeit von der Einarbeitung frischer Erntesterne. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **154**, 265-269.
- Sinton, S. M. & Wilson, D. R. (1999): Comparative performance of male and female plants during the annual growth cycle of a dioecious asparagus cultivar. *Acta Horticulturae* **479**, 347-353.
- Smith, M. (2006): Revised fao methodology for crop water requirements. www.fao.org/ag/agl/agles/webpub/termeth.htm, Abrufdatum: 12.06.2006
- Springob, G. & Mohnke, M. (1995): Winterliche N-Mineralisation in sandigen Böden des 'Fuhrberger Feldes' (Hannover). *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **158**, 243-249.
- Stadelmann, F. X., Furrer, O. J., Gupta, S. K. & Lischer, P. (1983): Einfluss von Bodeneigenschaften, Bodennutzung und Bodentemperatur auf die N-Mobilisierung von Kulturböden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **146**, 228-242.
- Stanford, G. & Smith, S. J. (1972): Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **36**, 876-870.
- Steffens, D., Pape, H. & Asche, E. (1996): Einfluss von Bioabfallkompost verschiedener Rottegrade auf die Bodenfruchtbarkeit. *VDLUFA-Schriftenreihe* **44**, 405-420.
- Stützel, H. & Bloom, P. (2002): Komposteinsatz im Gemüsebau. In: Handbuch Kompost im Gartenbau, 135-147. Förderungsges. Gartenbau e.V., Bonn.
- Sudo, E., Makino, A. & Mae, T. (2003): Differences between rice and wheat in ribulose-1,5-bisphosphate regeneration per unit of leaf-N content. *Plant, Cell and Environment* **26**, 255-263.
- Tränkner, A. & Dehne, H.-W. (2002): Kompost und Pflanzenschutz. In: Handbuch Kompost im Gartenbau, 95 - 109. Förderungsges. Gartenbau e.V., Bonn.
- Ulman, P., Catsky, J. & Pospisilova, J. (2000): Photosynthetic traits in wheat grown under decreased and increased CO₂ concentration, and after transfer to natural CO₂ concentration. *Biologia Plantarum* **43**, 227-237.

- Wallace, J. S. & Batchelor, C. H. (1997): Managing water resources for crop production. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B.* **352**, 937-947.
- Wilcox, D. (1985): Relationship between soil matric potential fern xylem potential and growth in asparagus. *Proceedings of the 6th Intern. Asp. Symp.*, 277-286.
- Wilcox-Lee, D. & Drost, D. T. (1990): Effect of soil moisture on growth, water relations and photosynthesis in an open-pollinated and male hybrid asparagus cultivar. *Acta Horticulturae* **271**, 457-465.
- Wilson, D. R., Cloughley, C. G. & Sinton, S. M. (2002): AspireNZ: A decision support system for managing root carbohydrate in asparagus. *Acta Horticulturae* **589**, 51-58.
- Wilson, D. R., Sinton, S. M. & Fraser-Kevern, H. A. (1996): Irrigation responses of established asparagus. *Acta Horticulturae* **415**, 333-341.
- Woolley, D. J., Hughes, A. R. & Nichols, M. A. (1999): Carbohydrate storage and re-mobilization in asparagus: Studies using dry weight changes, C¹⁴ and High Pressure Liquid Chromatography. *Acta Horticulturae* **479**, 305-312.
- Woolley, D. J., Sudjarmiko, S., Yen, Y., Fisher, K. J. & Nichols, M. A. (1996): Carbon dioxide exchange characteristics and relative growth rates of two asparagus cultivars in relation to temperature. *Acta Horticulturae* **415**, 201-207.
- Wuchner, A. & Hartmann, H. D. (1975): Spitzenwelke bei Spargel. *Gemüse* **11**, 246-247.
- Wullschleger, S. D. (1993): Biochemical limitations to carbon assimilation in C₃ plants - a retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. Experimental Botany* **44**, 907-920.
- Ziegler, J. (2002): Bleichspargelanbau. In: Neustadter Hefte 101. Staatl. Lehr- und Forschungsanstalt (SLFA), Neustadt / Weinstraße.
- Ziegler, J. & Hartmann, H. D. (1995): Empfehlungen für die Spargeldüngung. *Gartenbau Report*.
- Zöttl, H. (1968): Die Nachlieferung von Stickstoff aus dem Bodenvorrat. *Stickstoff* **12**, 8-16.

8 Anhang

Tab. 8.1: Chemische und physikalische Eigenschaften der organischen Dünger

Versuch	FV 02-04, GV 02, Klika 02			FV 00-04			GV 03	
Organische Dünger	PM 02	FK 02 (100 % GK)	CK	PM 00	FriKo (70 % BAK)	FK 00 (100 % GK)	PM 03	FK 03 (100 % GK)
Herkunft	n.b.*	Leese	n.b.**	n.b.*	Wesendorf	Leese	n.b.*	Leese
Probenahme	27.2.02	27.2.02	27.2.02	24.2.00	24.2.00	24.2.00	24.3.03	24.3.03
Analytik	LUFA Hameln	LUFA Hameln	LUFA Hameln	***	***	***	***	***
Vol.Gew. g/l FM	260	604 (764)	830 (510)	303	568	657	n.b.	n.b.
% TS	25.3 (39.28)	59.7 (55.9)	39.9 (40.2)	31.1	48.4	67	26.6	70.9
C _t % in TM	44.4	17.3 (16.0)	32.6 (31.4)	32.1	27.6	14.3	42.2	12
org. Substanz % in TM	81	32.1	62.7	73.4	46.1	24.7	n.b.	n.b.
C/N	29	15	13	18	19	13	24	11
pH	7.5	7.6	7.1	7.8	7.6	7.8	6.8	7
Salz g/l	n.b.	3.2	17.9	n.b.	1.4	3.4	n.b.	0.9
Rottegrad	n.b.	5	4	n.b.	3	5	n.b.	n.b.
Nährstoffe Gesamtgehalte								
N _t % in TM	1.2	1.1	2.5	1.8	1.4	1.1	1.77	1.06
P ₂ O ₅ % in TM	0.9	0.5	2.2	1.3	0.6	0.5	0.7	0.2
K ₂ O % in TM	3.4	1.0	3.3	4.5	0.9	1.2	1.3	0.8
MgO % in TM	0.5	2.7	0.8	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1
CaO % in TM	1.6	n.b.	n.b.	3.7	2.3	2.5	n.b.	n.b.
Lösliche Nährstoffe								
NO ₃ -N % in TM	n.b.	0.02	0.001	0.00	0.00	0.01	n.b.	n.b.
NH ₄ -N % in TM	0.01	0.00	0.15	0.03	0.00	0.03	n.b.	n.b.
P ₂ O ₅ % in TM	0.38	0.23	0.69	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
K ₂ O % in TM	1.67	0.82	2.84	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
MgO % in TM	0.21	0.06	0.25	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Schwermetallgehalte								
Blei mg/kg TM	3	39	6	6.7	29.6	38.6	n.b.	n.b.
Cadmium mg/kg TM	0.2	0.4	0.3	0.9	0.7	0.9	n.b.	n.b.
Chrom mg/kg TM	2	20	8	2.8	8.9	13.9	n.b.	n.b.
Kupfer mg/kg TM	13	43	40	39.7	31.7	30.4	n.b.	n.b.
Nickel mg/kg TM	2.0	8.0	4.0	3.8	8.3	11.5	n.b.	n.b.
Quecksilber mg/kg TM	0.0	0.1	0.1	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Zink mg/kg TM	66	161	239	215	113	122	n.b.	n.b.
Organische Schadstoffe								
CKW mg/kg TM	< 0.001	0.013	< 0.001	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
PAK mg/kg TM	0.06	1.17	0.07	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
PCB mg/kg TM	< 0.01	0.038	< 0.01	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
PCDD/F TE ng/kg TM	0.09	3.52	0.11	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

n.b. nicht bestimmt bzw. nicht bekannt

* vom Betriebsinhaber bereitgestellt

** von einem Entsorgungsunternehmen bereitgestellt

*** Labor des Instituts für Gemüse- und Obstbau, Universität Hannover

() Analyseergebnisse der LUFA Hameln, die zum Ausbringungstermin noch nicht vorlagen

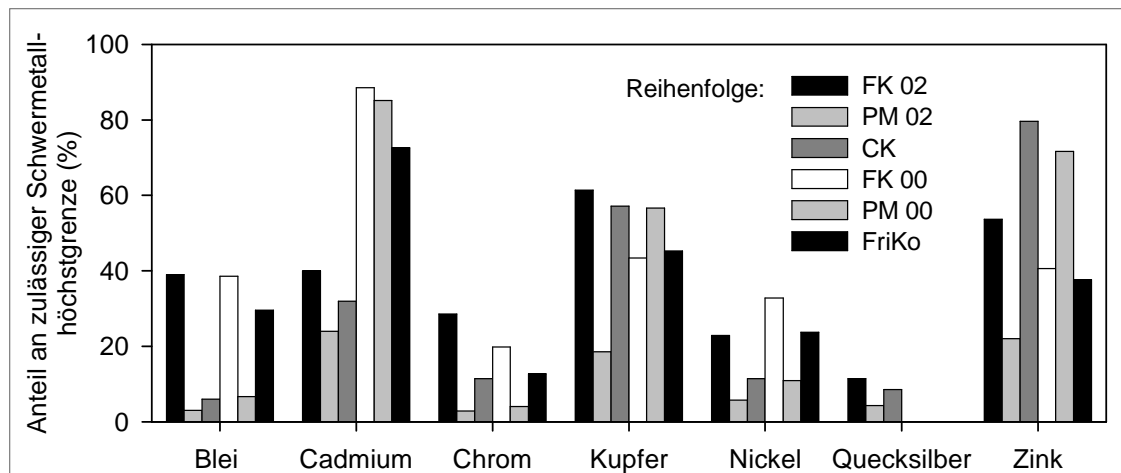


Abb. 8.1: Anteil der Schwermetallgehalte der organischen Dünger an den Schwermetallhöchstgrenzen in § 4, Abs. 3, Satz 2 BioAbfV (%)

Tab. 8.2: Aufwandmengen und Nährstofffrachten (kg/ha) der organischen Dünger in den Feld- und Gefäßversuchen

Versuch	FV 02-04, GV 02			FV 00-04			GV 03	
	FK 02	PM 02	CK	FK 00	FriKo	PM 00	FK 03	PM 03
Organische Dünger								
FM (t/ha)	44.3	40.7	35.2	20.9	18	9.6	47.1	35.6
TM (t/ha)	26	10	14	14	9	3	33	10
C	4000	4000	4000	2000	2412	960	4000	4000
N_{ges}	296	128	344	154	125	55	350	177
NO₃-N + NH₄-N	1.0	0.0	21.8	4.2	0.2	1.0	n.b.	n.b.
P₂O₅	138	92	302	67	48	39	67	67
K₂O	262	350	465	167	75	134	267	124
MgO	722	49	118	26	25	12	23	15
CaO	n.b.	160	n.b.	347	197	1972	n.b.	n.b.

n. b. nicht bestimmt

Tab. 8.3: Nährstoffgehalte der Substrate in GV 02 und Klika 02 zu Versuchsbeginn (28.03.02) und Zuordnung zu Bodengehaltsklassen*

		FK 02		PM 02		CK		Kontrolle	
P₂O₅	mg/100g TM	16	C	16	C	20	C	17	C
K₂O	mg/100g TM	10	B	10	B	17	C	7	B
MgO	mg/100g TM	11	E	11	E	12	E	10	E
CaO	mg/100g TM	82		112		101		98	
pH	CaCl ₂	5.7		6.0		5.8		5.3	
Salz	% in TM	0.02		0.02		0.04		0.01	
org. Subst.	% in TM	3.0		2.8		3.1		3.3	
N_{min}	kg/ha	21.4		25.3		47.9		7.7	
C_t	% in TM	1.534		1.528		1.764		1.719	
N_t	% in TM	0.069		0.069		0.082		0.077	

* Richtwerte für den Spargelanbau (Anonym 2001)

Tab. 8.4: Nährstoffgehalte im Boden im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	N_{min}-Rest (kg/ha)	P₂O₅	K₂O* (mg/100g)	MgO	pH (CaCl ₂)	Salz (%)
50 % GK	4.8 AB	17.0	6.8 A	14.1	5.9 B	0.061
70 % GK	4.6 B	16.4	3.6 B	12.4	6.0 A	0.058
85 % GK	5.7 A	18.0	6.3 A	13.9	6.0 A	0.074
FK 02	4.8 b	16.1 b	4.1 b	13.2	6.0 b	0.055 b
PM 02	5.0 b	16.0 b	4.3 b	13.2	6.0 b	0.051 b
CK	6.4 a	20.0 a	11.8 a	14.9	6.2 a	0.091 a
Kontrolle	3.8 b	16.4 b	2.1 b	12.5	5.7 c	0.060 b

* Wechselwirkungen zwischen Wasserstufen und organischer Düngung

Tab. 8.5: Nährstoffgehalte der Substrate in GV 03 und GV 04 zu Versuchsbeginn am 01.04.03 bzw. 01.07.04 und Zuordnung zu Boden-gehaltsklassen*

		PM 03		GV 03		Kontrolle		GV 04	
				FK 03					
P₂O₅	mg/100g TM	17	C	18	C	18	C	14	C
K₂O	mg/100g TM	15	C	20	D	13	C	14	C
MgO	mg/100g TM	10	E	11	E	10	E	10	E
CaO	mg/100g TM	n.b.		n.b.		n.b.		n.b.	
pH	CaCl ₂	5.2		5.3		5.1		n.b.	
Salz	% in TM	0.03		0.05		0.02		0.03	
o.S.	% in TM	3.17		3.27		3.08		n.b.	
N_{min}	kg/ha	17.0		14.2		13.8		31.9	

* Richtwerte für den Spargelanbau (Anonym 2001)

o.S. organische Substanz

n.b. nicht bestimmt

Tab. 8.6: Nährstoffgehalte im Boden im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	N_{min}-Rest (kg/ha)	P₂O₅ (mg/100g)	K₂O	MgO	pH (CaCl ₂)	Org. Subst. (%)	Salz (%)
50 % GK	12.5	13.4	6.7	12.0	5.7	2.98	0.072
70 % GK	17.3	13.6	6.5	12.0	5.7	2.94	0.072
85 % GK	42.4	13.8	5.2	12.2	5.7	2.96	0.078
FK 03	31.9	13.9	7.5	12.5	5.8 a	2.90 b	0.076
PM 03	15.6	13.9	5.7	11.7	5.6 c	3.08 a	0.071
Kontrolle	24.7	12.9	5.3	12.0	5.7 b	2.89 b	0.076
niedr. N-Stufe	15.6	13.5	6.7	11.8	5.7	2.95	0.070
hohe N-Stufe	32.6	13.6	5.6	12.3	5.7	2.97	0.078

Tab. 8.7: Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Aufwuchs			Krone		
	N	K	Ca*	N	K	Ca
50 % GK	0.79 A	2.05	1.33	0.87 A	1.75	0.057 B
70 % GK	0.69 B	1.90	1.33	0.61 B	1.64	0.059 B
85 % GK	0.66 B	2.05	1.33	0.57 B	1.77	0.064 A
FK 02	0.76 a	2.10 ab	1.32 ab	0.72 ab	1.61 b	0.057 b
PM 02	0.66 b	2.08 ab	1.20 b	0.66 bc	1.75 ab	0.061 ab
CK	0.69 ab	2.26 a	1.29 ab	0.58 c	1.91 a	0.066 a
Kontrolle	0.76 a	1.57 b	1.51 a	0.78 a	1.60 b	0.058 b

* Wechselwirkungen zwischen Wasserstufen und organischer Düngung

Tab. 8.8: Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (g/Pfl. bzw. Pflanzenteil) im GV 02 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$), bei N-, Ca-, Mg- und P-Akkumulation in den Kronen sowie N- und P-Akkumulation in den Gesamtpflanzen lagen Wechselwirkungen zwischen den Versuchsfaktoren vor

		N	K	Ca	Mg	P
Aufwuchs	50 % GK	0.37	0.95	0.62	0.11	0.03
	70 % GK	0.37	0.96	0.71	0.15	0.04
	85 % GK	0.32	0.96	0.63	0.10	0.04
	FK 02	0.40 ab	1.09	0.69 b	0.11	0.04
	PM 02	0.30 bc	0.92	0.53 c	0.14	0.04
	CK	0.25 c	0.83	0.46 c	0.07	0.03
	Kontrolle	0.47 a	0.99	0.92 a	0.15	0.04
	Krone	50 % GK	1.86 A	3.72 B	0.12 B	0.15 B
70 % GK		1.58 B	4.19 A	0.15 A	0.18 A	0.48 A
85 % GK		1.30 C	3.81 AB	0.14 A	0.15 B	0.45 AB
FK 02		1.74 b	3.98 ab	0.14 ab	0.17 a	0.47 ab
PM 02		1.38 c	3.66 b	0.13 b	0.15 b	0.44 b
CK		1.13 d	3.65 b	0.13 b	0.13 b	0.40 c
Kontrolle		2.07 a	4.33 a	0.16 a	0.19 a	0.50 a
Gesamtpflanze		50 % GK	2.24 A	4.67	0.74	0.26
	70 % GK	1.94 B	5.15	0.86	0.33	0.52 A
	85 % GK	1.63 C	4.77	0.77	0.25	0.49 AB
	FK 02	2.14 b	5.07 ab	0.84 b	0.29 ab	0.50 ab
	PM 02	1.67 c	4.58 ab	0.66 c	0.29 ab	0.48 b
	CK	1.39 d	4.49 b	0.59 c	0.20 b	0.44 c
	Kontrolle	2.54 a	5.32 a	1.08 a	0.34 a	0.54 a

Tab. 8.9: Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung und Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	Aufwuchs			Krone		
	N	K	Ca	N	K	Ca
50 % GK	0.85	1.79	1.64	0.53 A	1.49	0.235
70 % GK	0.83	1.78	1.63	0.47 B	1.50	0.225
85 % GK	0.82	1.82	1.65	0.48 AB	1.46	0.225
FK 03	0.85	1.82 ab	1.64	0.51	1.48 ab	0.238
PM 03	0.84	1.91 a	1.57	0.51	1.55 a	0.220
Kontrolle	0.82	1.66 b	1.72	0.47	1.43 b	0.228
niedr. N-Stufe	0.84	1.88 a'	1.67	0.48	1.52 a'	0.227
hohe N-Stufe	0.83	1.71 b'	1.62	0.50	1.46 b'	0.230

Tab. 8.10: Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (g/Pfl. bzw. Pflanzenteil) im GV 03 bei Endauswertung; Mittelwerte über organische Düngung, Wasser- und N-Stufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

	N	K	Ca	Mg	P	
Aufwuchs	50 % GK	0.28	0.58	0.533	0.060	0.031
	70 % GK	0.30	0.63	0.576	0.064	0.034
	85 % GK	0.28	0.62	0.565	0.060	0.038
	FK 03	0.32 a	0.67 a	0.609	0.065	0.037
	PM 03	0.28 b	0.65 a	0.531	0.061	0.035
	Kontrolle	0.25 b	0.50 b	0.535	0.059	0.032
	niedr. N-Stufe	0.25 b'	0.56 b'	0.499 b'	0.055 b'	0.033
	hohe N-Stufe	0.32 a'	0.66 a'	0.617 a'	0.068 a'	0.036
Krone	50 % GK	1.21	3.44 B	0.536	0.160	0.384 B
	70 % GK	1.18	3.76 A	0.568	0.170	0.434 A
	85 % GK	1.16	3.56 AB	0.550	0.159	0.429 A
	FK 03	1.28 a	3.84 a	0.617 a	0.177 a	0.434 a
	PM 03	1.22 a	3.70 a	0.527 b	0.164 a	0.440 a
	Kontrolle	1.05 b	3.22 b	0.510 b	0.147 b	0.373 b
	niedr. N-Stufe	1.03 b'	3.27 b'	0.489 b'	0.145 b'	0.386 b'
	hohe N-Stufe	1.34 a'	3.91 a'	0.615 a'	0.181 a'	0.445 a'
Gesamtpflanze	50 % GK	1.48	4.02 B	1.070	0.220	0.415 B
	70 % GK	1.47	4.40 A	1.144	0.234	0.468 A
	85 % GK	1.44	4.17 AB	1.116	0.219	0.467 A
	FK 03	1.60 a	4.51 a	1.226 a	0.242 a	0.470 a
	PM 03	1.50 b	4.35 a	1.059 b	0.226 ab	0.475 a
	Kontrolle	1.30 c	3.73 b	1.045 b	0.206 b	0.405 b
	niedr. N-Stufe	1.28 b'	3.83 b'	0.988 b'	0.200 b'	0.420 b'
	hohe N-Stufe	1.65 a'	4.56 a'	1.231 a'	0.249 a'	0.481 a'

Tab. 8.11: Nährstoffgehalte im FV 02-04 in den Bodentiefen 0-30 cm und 30-60 cm in Spargelreihe und Zwischenreihenbereich (Weg) und Zuordnung zu Bodengehaltsklassen*; Mittelwerte über alle Parzellen

	01.02.02		05.02.03		10.11.03				04.02.04							
	0-30 cm		Reihe	Weg	Reihe		Weg		0-30 cm							
	0-30 cm		0-30 cm		0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm							
P₂O₅ mg/100g TM	29	D	19	C	19	C	13	C	12	C	12	C	6	B	13	C
K₂O mg/100g TM	4	A	4	A	3	A	10	B	5	A	5	A	3	A	7	B
MgO mg/100g TM	6	C	7	D	6	C	6	C	6	C	7	D	4	B	7	D
CaO mg/100g TM	105		30.1		32.9		n.b.		n.b.			n.b.		n.b.		91.8
pH CaCl ₂	6.7		5.9		5.9		5.8		6.0		5.9		5.7		6.2	
Salz % in TM	0.04		0.01		0.01		0.02		0.02		0.01		0.01		0.02	
o.S. % in TM	3.32		3.05		3.04		3.19		3.09		2.99		1.83		2.9	

* Richtwerte für den Spargelanbau (Anonym 2001)

o.S. organische Substanz

n.b. nicht bestimmt

Tab. 8.12: Nährstoffgehalte im FV 00-04 in 0-30 cm Bodentiefe und Zuordnung zu Bodengehaltsklassen*; Mittelwerte über alle Parzellen

		01.02.02		05.02.03		18.02.04	
P₂O₅	mg/100g TM	15	C	18	C	14	C
K₂O	mg/100g TM	6	B	5	A	7	B
MgO	mg/100g TM	7	D	6	C	5	C
CaO	mg/100g TM	46		14		61	
pH	CaCl ₂	5.4		5.0		5.9	
Salz	% in TM	0.01		0.01		0.02	
o.S.	% in TM	2.2		2.1		2.0	

* Richtwerte für den Spargelanbau (Anonym 2001)

o.S. organische Substanz

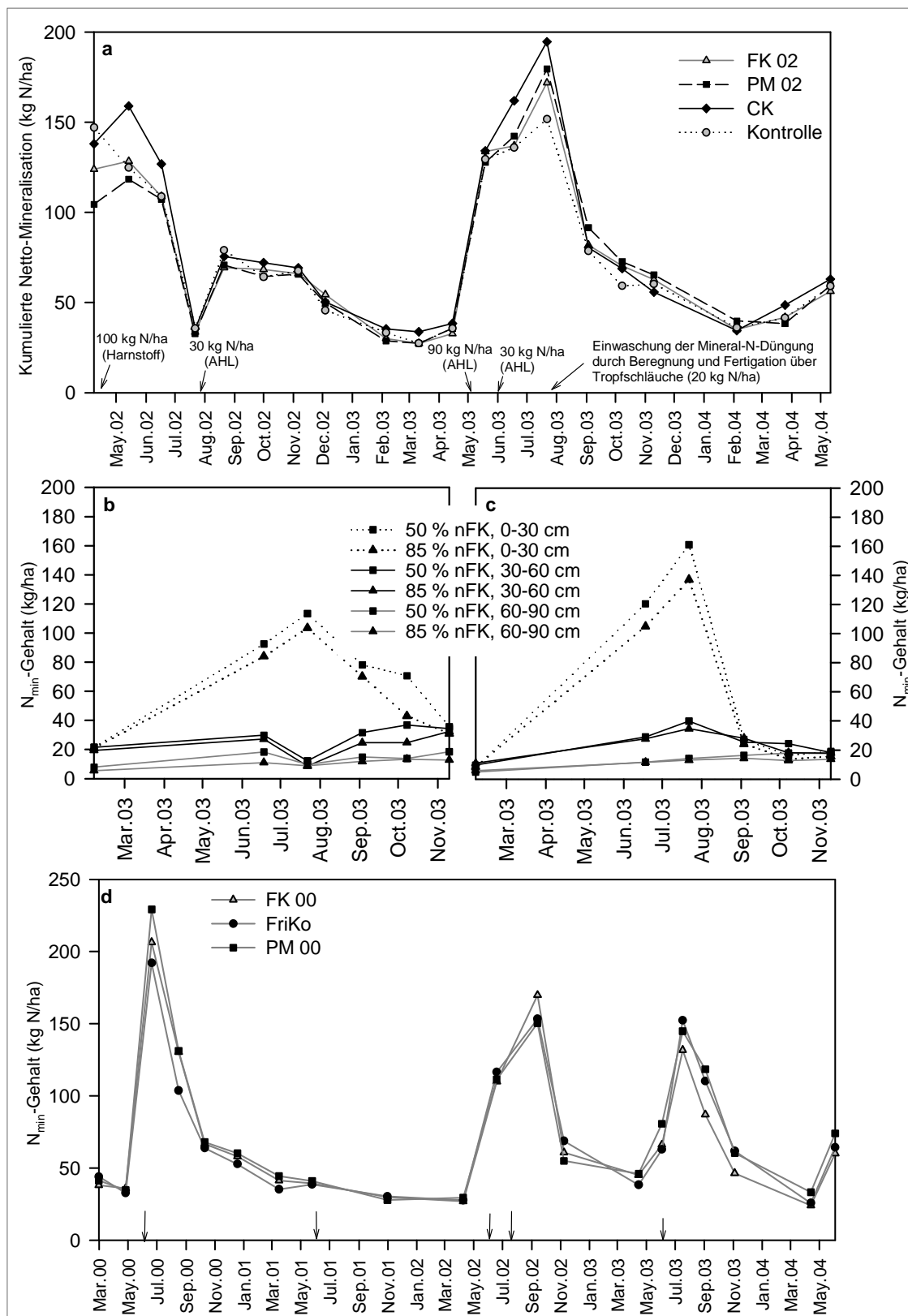


Abb. 8.2: Zeitlicher Verlauf der N_{min} -Werte (kg/ha) im FV 02-04 als Mittelwerte über Wasserstufen (0-90 cm) (a) und organischer Düngung (0-30, 30-60, 60-90 cm Bodentiefe) in Spargelreihen (b) und Zwischenreihenbereich (c), sowie im FV 00-04 (Mittelwerte über Aufwandmengen) (0-90 cm) (d); keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$), Pfeile kennzeichnen Termine der Mineral-N-Düngung

Tab. 8.13: Nährstoffgehalte in der Pflanzenmasse (% in TM) im FV 02-04 im September des 1. und 2. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$)

		Aufwuchs			Krone		
		N	K	Ca	N	K	Ca
September 02	50 % nFK	2.05	2.06	0.388	1.18	1.12	0.083
	85 % nFK	2.02	2.25	0.403	1.07	1.17	0.089
	FK 02	2.04	2.21	0.372	1.08	1.13	0.087
	PM 02	2.00	2.11	0.391	1.16	1.17	0.081
	CK	2.01	2.28	0.379	1.16	1.19	0.087
	Kontrolle	2.08	2.01	0.440	1.11	1.09	0.090
September 03	50 % nFK	1.75 B	2.36	1.015	1.55	1.44	0.342
	85 % nFK	1.87 A	2.62	0.842	1.55	1.52	0.385
	FK 02	1.85	2.57	0.892	1.50	1.50	0.371
	PM 02	1.83	2.49	0.920	1.59	1.49	0.357
	CK	1.77	2.52	0.959	1.59	1.53	0.359
	Kontrolle	1.78	2.38	0.942	1.53	1.40	0.368

Tab. 8.14: Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (kg/ha) im FV 02-04 im September des 1. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)

		N	K	Ca	Mg	P
Aufwuchs	50 % nFK	43.86	45.07	8.13	3.00	5.68
	85 % nFK	45.83	50.94	9.20	3.16	6.14
	FK 02	40.86	44.55	7.33	2.68	5.40
	PM 02	44.60	46.30	8.97	3.16	6.18
	CK	51.91	59.63	9.72	3.38	6.70
	Kontrolle	42.02	41.54	8.64	3.10	5.36
Krone	50 % nFK	20.26	19.21	1.41	1.27	3.75
	85 % nFK	20.96	23.05	1.75	1.42	4.10
	FK 02	18.42	19.42	1.50	1.24	3.69
	PM 02	22.37	22.60	1.56	1.39	4.27
	CK	21.71	22.67	1.64	1.41	3.90
	Kontrolle	19.93	19.82	1.62	1.32	3.85
Gesamtpflanze	50 % nFK	64.12	64.28	9.54	4.27	9.43
	85 % nFK	66.79	73.98	10.95	4.57	10.24
	FK 02	59.27	63.96	8.83	3.92	9.09
	PM 02	66.98	68.90	10.53	4.55	10.45
	CK	73.62	82.30	11.36	4.80	10.59
	Kontrolle	61.95	61.37	10.26	4.42	9.21

Tab. 8.15: Nährstoffakkumulation in den Pflanzen (kg/ha) im FV 02-04 im September des 2. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)

		N	K	Ca	Mg	P
Aufwuchs	50 % nFK	78.25	105.20	45.31	6.64	7.84
	85 % nFK	107.10	150.50	48.36	7.21	12.91
	FK 02	89.95	126.03	43.58	6.62	10.11
	PM 02	109.43	148.72	54.72	7.81	12.39
	CK	80.47	114.32	43.15	6.35	8.87
	Kontrolle	90.86	122.33	45.88	6.93	10.12
Krone	50 % nFK	91.57	85.44	20.15	4.83	11.69
	85 % nFK	74.73	73.27	18.38	4.11	11.12
	FK 02	81.32	81.25	19.92	4.61	11.73
	PM 02	88.15	81.89	19.60	4.72	12.30
	CK	81.35	78.74	18.28	4.27	10.86
	Kontrolle	81.76	75.55	19.26	4.29	10.72
Gesamtpflanze	50 % nFK	169.82	190.64	65.46	11.47	19.53
	85 % nFK	181.83	223.77	66.74	11.32	24.03
	FK 02	171.27	207.29	63.50	11.24	21.85
	PM 02	197.58	230.61	74.32	12.52	24.69
	CK	161.82	193.06	61.43	10.61	19.73
	Kontrolle	172.62	197.88	65.14	11.22	20.84

Tab. 8.16: Kohlenhydratgehalte (% Brix) und -reserven (mg CH₂O/g TM) in den Speicherwurzeln im FV 02-04 im November des 2. sowie April und Mai des 3. Standjahres; Mittelwerte über organische Düngung und Wasserstufen, keine signifikanten Unterschiede ($p < 0.05$)

	Kohlenhydratgehalte (% Brix)			Kohlenhydratreserven (mg CH ₂ O/g TM)*		
	12.11.03	20.04.04	26.05.04	12.11.03	20.04.04	26.05.04
50 % nFK	28.5	15.9	11.1	724	427	316
85 % nFK	27.3	15.2	10.6	696	413	305
FK 02	27.3	15.7	10.9	696	424	311
PM 02	28.8	15.1	11.3	732	410	321
CK	25.9	15.9	10.9	662	429	311
Kontrolle	29.6	15.5	10.4	750	419	298

*Umrechnung mit AspireNZ, verändert

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. H. Stützel für die vertrauensvolle Überlassung des Themas und den mir zur Bearbeitung gewährten Freiraum bedanken.

Herrn Prof. Dr. P.-J. Paschold darf ich für die Übernahme des Korreferats danken.

Meinen ehemaligen Kollegen des Fachgebietes Systemmodellierung Gemüsebau danke ich ganz herzlich für die freundliche Unterstützung und Zusammenarbeit. An dieser Stelle sei besonders Frau Marlies Lehmann für ihren unentwegten Einsatz bei der Analyse der unzähligen Bodenproben gedankt.

Herrn Peter Cramm danke ich besonders für die tatkräftige Unterstützung als studentische Hilfskraft bzw. Diplomand bei der Datenerhebung im Feld.

Frau Petra Bloom danke ich für die umfangreiche Einarbeitung in das Themengebiet.

Mein besonders herzlicher Dank gilt der Familie Heuer aus Fuhrberg für die Bereitstellung der umfangreichen Versuchsflächen und die Berücksichtigung dieser bei den Bearbeitungs- und Erntemaßnahmen. Außerdem bedanke ich mich für die große Hilfsbereitschaft, die mir stets entgegen gebracht wurde. Neben meiner Forschungstätigkeit habe ich weitreichende Einblicke in die Organisation und Vermarktung eines expandierenden Spargel-Familienbetriebes erhalten, die ich nicht missen möchte.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) sei für die finanzielle Unterstützung der vorliegenden Arbeit gedankt.

Lebenslauf

Name: Iris Schaper, geb. Ehler

Geburtsdatum und -ort: 02.10.1977 in Bremerhaven

Familienstand: Verheiratet, eine Tochter

Schulbildung: Gymnasium Wesermünde in Bremerhaven,
Abitur 1997

1997 bis 2001 Studium der Agrarwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Abschluss als Diplom-Agraringenieurin im Oktober 2001

Okt. 2001 – März 2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Gemüse- und Obstbau, Abt. Gemüsebau (Institut für Biologische Produktionssysteme, Fachgebiet Systemmodellierung Gemüsebau) der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

bis Aug. 2008 Fertigstellung der Promotion und Elternzeit