

Christian Antonius Menke

**Evaluierung von  
Winterzwischenfrüchten in einem  
Zweikultur-Nutzungssystem mit Mais  
für die Biogaserzeugung**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# **Evaluierung von Winterzwischenfrüchten in einem Zweikultur-Nutzungssystem mit Mais für die Biogaserzeugung**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät für Agrarwissenschaften

der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Christian Antonius Menke

geboren in Hilstrup

Göttingen, im Februar 2011

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-678-9

D7

1. Referent: Professor Dr. Rolf Rauber

2. Referent: Professor Dr. Johannes Isselstein

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Februar 2011

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-678-9

*„Landwirte sind diejenigen,  
die die Sonne beernten“.*

Kord Baeumer

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>4</b>
2.1 Versuchsstandorte .....	4
2.2 Witterung im Versuchszeitraum .....	5
2.3 Versuchsanlage .....	7
2.4 Versuchsdurchführung .....	8
2.5 Versuchsglieder .....	8
2.6 Datengewinnung .....	13
2.6.1 Termine der Beprobungen .....	13
2.6.2 Gewinnung der Sprossdaten.....	13
2.6.3 Gewinnung der Wurzeldata.....	14
2.6.4 Nmin-Beprobung.....	15
2.7 Methangehalt und Methanertrag .....	16
2.8 Abschätzung des symbiotisch fixierten Stickstoffs.....	17
2.9 Ligningehalt .....	18
2.10 Energiemais.....	18
2.11 Statistik .....	19
2.12 Berechnung des Indexes der relativen Anbauwürdigkeit ( $I_{RA}$ ) der geprüften Varianten .....	19
2.12.1 Nmin-Index .....	20
2.12.2 Winterzwischenfrucht-Index .....	20
2.12.3 Energiemais-Index .....	21
2.12.4 Gesamtindex $I_{RA}$ .....	21
<b>3 Ergebnisse .....</b>	<b>22</b>
3.1 Sprosswachstum.....	22
3.1.1 Sprossmasse .....	22
3.1.2 Wachstumsraten.....	33
3.1.3 Trockenmassegehalte.....	35
3.1.4 Stickstoff in der Sprossmasse .....	39
3.1.5 Spezifischer Methanertrag .....	43
3.1.6 Ligningehalt .....	44

---

3.2	Wurzelwachstum.....	45
3.2.1	Wurzelmasse.....	45
3.2.2	C/N-Verhältnis der Wurzeln.....	49
3.2.3	Wurzellängendichte.....	52
3.2.4	N in der Wurzelmasse.....	58
3.3	Nmin-Werte.....	60
3.4	Abschätzung des symbiotisch fixierten Stickstoffs.....	70
3.5	Korrelationen.....	71
3.5.1	Korrelationen zwischen den erfassten Merkmalen.....	71
3.5.2	Korrelationen bei Pflanzengruppen.....	73
3.6	Energiemais.....	74
3.7	Abschätzung der Summe der Methanerträge aus Winterzwischenfrüchten und Energiemais.....	77
3.8	Indexberechnungen.....	80
3.8.1	Nmin-Index.....	80
3.8.2	Winterzwischenfrucht-Index.....	82
3.8.3	Energiemais-Index.....	84
3.8.4	Gesamtindex $I_{RA}$ .....	86
3.8.5	Mittelwert des Gesamtindex $I_{RA}$ über beide Versuchsjahre.....	88
<b>4</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>90</b>
4.1	Sprosswachstum.....	90
4.1.1	Sprossmasse.....	90
4.1.2	Stickstoff in der Sprossmasse.....	98
4.2	Silierfähigkeit der Winterzwischenfrüchte.....	102
4.3	Wurzelwachstum.....	104
4.3.1	Charakterisierung der Beprobungsvorgänge im Feldversuch.....	104
4.3.2	Wurzelsysteme.....	105
4.3.3	Wurzelmasse.....	107
4.4	Nmin-Werte.....	109
4.5	Sprossmasse des Energiemaises.....	114
4.6	Methanerträge.....	118
4.6.1	Spezifischer Methanertrag der Winterzwischenfrüchte.....	118
4.6.2	Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte.....	119
4.6.3	Summe der Methan-Flächenerträge aus Winterzwischenfrüchten und Mais ..	120
4.7	Korrelationen zwischen den erfassten Merkmalen.....	122
4.8	Indexberechnungen.....	124
4.8.1	Bewertung der Winterzwischenfrüchte anhand ihres $I_{RA}$ -Wertes.....	124
4.8.2	Charakterisierung von $I_{RA}$ .....	125
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>129</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>130</b>

---

<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>133</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>A1</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Niederschlag als Monatssummen im Versuchszeitraum und im langjährigen Mittel. ....	5
Abbildung 2: Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur im Versuchszeitraum und Lufttemperaturen im langjährigen Mittel. ....	6
Abbildung 3: Skizze einer Versuchsparzelle .....	7
Abbildung 4: Versuchsplan. ....	9
Abbildung 5: Wachstumsraten für den Zeitraum vom 16. April 2007 bis 21. Mai 2007. ....	34
Abbildung 6: Wachstumsraten für den Zeitraum vom 16. April 2008 bis 20. Mai 2008. ....	35
Abbildung 7A: Trockenmasse der Wurzeln im Dezember 2006. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 11,4 dt TM ha <sup>-1</sup> B: Trockenmasse der Wurzeln in zwei Tiefenstufen im Mai 2007. Die Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 26,9 dt TM ha <sup>-1</sup> . ....	46
Abbildung 8A: Trockenmasse der Wurzeln im Dezember 2007. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 11,5 dt TM ha <sup>-1</sup> B: Trockenmasse der Wurzeln in zwei Tiefenstufen im Mai 2008. Die Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 26,7 dt TM ha <sup>-1</sup> .....	48
Abbildung 9: Wurzellängendichte im Dezember 2006 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 1,7 cm cm <sup>-3</sup> . ....	52
Abbildung 10: Wurzellängendichte im Mai 2007 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 7 cm cm <sup>-3</sup> . ....	53
Abbildung 11: Wurzellängendichte im Mai 2007 in der Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 4,4 cm cm <sup>-3</sup> . ....	54
Abbildung 12: Wurzellängendichte im Dezember 2007 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert, der Standardfehler des Mittelwertes und die Grenzdifferenz. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 1,8 cm cm <sup>-3</sup> . ....	55
Abbildung 13: Wurzellängendichte im Mai 2008 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert, der Standardfehler des Mittelwertes und die Grenzdifferenz. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 5,8 cm cm <sup>-3</sup> . ....	56
Abbildung 14: Wurzellängendichte im Mai 2008 in der Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 1,7 cm cm <sup>-3</sup> . ....	57
Abbildung 15: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Dezember 2006. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 41,4 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . Die gestrichelte Linie stellt den mittleren Nmin-Wert zum Zeitpunkt der Aussaat (0 cm bis 90 cm) dar. ....	61
Abbildung 16: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im März 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 22,3 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . ....	62
Abbildung 17: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im April 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 14,7 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . ....	63

Abbildung 18: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Mai 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 25,1 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . .....	64
Abbildung 19: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Dezember 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 31,8 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . Die gestrichelte Linie stellt den mittleren Nmin-Wert zum Zeitpunkt der Aussaat (0 cm bis 90 cm) dar. ....	65
Abbildung 20: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im März 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 25,3 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . .....	67
Abbildung 21: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im April 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 14 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . .....	68
Abbildung 22: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Mai 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 9,5 kg Nmin ha <sup>-1</sup> . .....	69
Abbildung 23: Geschätzter Methanertrag der Winterzwischenfrüchte und des nachgebauten Energiemaies im Versuchsjahr 2006/2007. Die dargestellten Methanerträge der Winterzwischenfrüchte wurden aus den TM-Erträgen im Mai 2007 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet. Die Methanerträge des Energiemaies wurden aus den TM-Erträgen des Energiemaies im November 2007 und einer angenommenen, pauschalen spezifischen Methanausbeute von 0,321 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg TM <sup>-1</sup> (Döhler et al. 2009) errechnet. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule, $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 2630 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> . .....	78
Abbildung 24: Geschätzter Methanertrag der Winterzwischenfrüchte und des nachgebauten Energiemaies im Versuchsjahr 2007/2008. Die dargestellten Methanerträge der Winterzwischenfrüchte wurden aus den TM-Erträgen im Mai 2008 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet. Die Methanerträge des Energiemaies wurden aus den TM-Erträgen des Energiemaies im November 2008 und einer angenommenen, pauschalen spezifischen Methanausbeute von 0,321 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg TM <sup>-1</sup> (Döhler et al. 2009) errechnet. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule, $GD_{5\%}$ (Tukey-Test) = 1419 Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> . .....	79
Abbildung 25: Charakterisierung der Nmin-Absenkung im Boden mit Hilfe des Index <sub>Nmin</sub> zum Zeitpunkt Dezember 2006. ....	80
Abbildung 26: Charakterisierung der Nmin-Absenkung im Boden mit Hilfe des Index <sub>Nmin</sub> zum Zeitpunkt Dezember 2007. ....	81
Abbildung 27: Charakterisierung der Methanbildung (Methan-Flächenerträge) der Winterzwischenfrüchte mit Hilfe des Index <sub>WZfr</sub> zum Zeitpunkt Mai 2007. ....	82
Abbildung 28: Charakterisierung der Methanbildung (Methan-Flächenerträge) der Winterzwischenfrüchte mit Hilfe des Index <sub>WZfr</sub> zum Zeitpunkt Mai 2008. ....	83
Abbildung 29: Charakterisierung des Maisertrages in Abhängigkeit von den Winterzwischenfrüchten mit Hilfe des Index <sub>Mais</sub> zum Zeitpunkt November 2007. ....	84
Abbildung 30: Charakterisierung des Maisertrages in Abhängigkeit von den Winterzwischenfrüchten mit Hilfe des Index <sub>Mais</sub> zum Zeitpunkt November 2008. ....	85
Abbildung 31: Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit I <sub>RA</sub> für die Winterzwischenfrüchte des ersten Versuchsjahres 2006/2007. ....	87
Abbildung 32: Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit I <sub>RA</sub> für die Winterzwischenfrüchte des zweiten Versuchsjahres 2007/2008. ....	88

Abbildung 33: Mittlerer Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit $I_{RA}$ von Winterzwischenfrüchten. Mittelwert aus den zwei Versuchsjahren 2006/2007 und 2007/2008. ....	89
Abbildung 34: Mittlere Teil-Indizes und mittlerer Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit $I_{RA}$ von Winterzwischenfrüchten. Mittelwerte aus den zwei Versuchsjahren 2006/2007 und 2007/2008. ....	128

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenkennwerte der beiden Versuchsstandorte zu Versuchsbeginn. ....	4
Tabelle 2: Liste der geprüften Winterzwischenfrucht-Varianten.....	10
Tabelle 3: Übersicht über die Gruppierung der Versuchsvarianten zu Pflanzengruppen. ....	11
Tabelle 4: Saatstärke, Tausendkorngewicht (TKG) und Keimfähigkeit der Winterzwischenfrüchte. ....	12
Tabelle 5: Beprobungstermine. ....	13
Tabelle 6: Leguminosen-Varianten und Referenzpflanzen, die zur Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge dienen.....	17
Tabelle 7: Winterzwischenfrüchte für die Ligninbestimmung. ....	18
Tabelle 8: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Dezember 2006.....	23
Tabelle 9: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin März 2007. ....	25
Tabelle 10: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin April 2007.....	26
Tabelle 11: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Mai 2007. ....	27
Tabelle 12: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Dezember 2007.....	29
Tabelle 13: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin März 2008. ....	30
Tabelle 14: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin April 2008.....	31
Tabelle 15: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Mai 2008. ....	32
Tabelle 16: Trockenmassegehalt in % der Frischmasse im oberirdischen Pflanzmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2006/2007. ....	36
Tabelle 17: Trockenmassegehalt in % der Frischmasse im oberirdischen Pflanzmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2007/2008. ....	37
Tabelle 18: Stickstoffmenge im oberirdischen Pflanzenmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2006/2007. ....	40
Tabelle 19: Stickstoffmenge im oberirdischen Pflanzenmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2007/2008. ....	42
Tabelle 20: Spezifischer Methanertrag der in Reinsaat angebauten Winterzwischenfrüchte im Mai 2008. ....	43
Tabelle 21: Ligningehalte ausgewählter Winterzwischenfrüchte im April 2008 und Mai 2008. ....	44
Tabelle 22: C/N-Verhältnis der Wurzeln an vier Beprobungsterminen.....	51
Tabelle 23: Stickstoffmengen im unterirdischen Pflanzenmaterial an vier Beprobungsterminen [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]. ....	59
Tabelle 24: Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Mai 2007 (erweiterte Differenzmethode). ....	70

---

Tabelle 25: Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Mai 2008 (erweiterte Differenzmethode). .....	71
Tabelle 26: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Parameter des Versuchsjahres 2006/2007; n = 132; Korrelation nach Pearson.....	72
Tabelle 27: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Parameter des Versuchsjahres 2007/2008; n = 132; Korrelation nach Pearson.....	72
Tabelle 28: Korrelationen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten (0 cm bis 90 cm) im Dezember 2006 (Korrelation nach Pearson). ..	73
Tabelle 29: Korrelationen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten (0 cm bis 90 cm) im Dezember 2007 (Korrelation nach Pearson). ..	74
Tabelle 30: TM-Erträge des Energiemaises zum Erntetermin November 2007. ....	75
Tabelle 31: TM-Erträge des Energiemaises zum Erntetermin November 2008. ....	76
Tabelle A1: Spezifischer Methanertrag der Gemenge-Varianten, errechnet aus den spezifischen Methanerträgen der am jeweiligen Gemenge beteiligten Varianten in Reinsaat vom Mai 2008, gewichtet mit den Ertragsanteilen der Ernte im Mai 2008.....	A1
Tabelle A2: Methan-Flächenertrag der Winterzwischenfrüchte im Mai 2007 und 2008. Die aufgeführten Methanerträge wurden aus TM-Erträgen im Mai 2007 bzw. Mai 2008 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet.....	A2
Tabelle A3: Methan-Flächenerträge des Energiemaises im November 2007 und 2008 nach verschiedenen Vorfrüchten. Die aufgeführten Methanerträge wurden aus den TM-Erträgen des Maises und einem pauschalen spezifischen Methanertrag von $0,321 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$ (Döhler et al. 2009) berechnet.....	A3

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abw	Abweichung
d	Tag
FM	Frischmasse
KF	Keimfähigkeit
L	Lehm
n. s.	nicht signifikant
PK	Pufferkapazität
Temp	Temperatur
tL	toniger Lehm
TM	Trockenmasse
VK	Vergärbarkeitskoeffizient
Z	Zucker

### Abkürzungen der Monatsnamen

Jan	Januar
Feb	Februar
Mrz	März
Apr	April
Jun	Juni
Jul	Juli
Aug	August
Sep	September
Okt	Oktober
Nov	November
Dez	Dezember

### Abkürzungen in der Beschriftung der Versuchsglieder

AB	Ackerbohnen
E	Erbsen
GEM	Gemenge



# 1 Einleitung

Es ist ein aktuelles politisches Ziel, die Versorgung der Bevölkerung mit elektrischer Energie zunehmend aus regenerativen Quellen zu bewerkstelligen. Mit dem Beschluss des EEG (Erneuerbare-Energie-Gesetz, Bundesministerium für Justiz 2008) sollen Biokraftstoffe sowie Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien gefördert werden, um so bis zum Jahr 2020 den Energieverbrauch durch Strom in Deutschland zu mindestens 30% aus erneuerbarer Energie decken zu können.

Eine Möglichkeit zur Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energie ist durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen gegeben. Hier kann durch die Vergärung von Biomasse brennbares Gas (Methan) erzeugt werden, welches anschließend in einem Blockheizkraftwerk zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Die wichtigste Biomassequelle für Biogasanlagen in Deutschland ist derzeit der Mais. Durch enge Fruchtfolgen wird dessen Anbau jedoch zunehmend von Schaderregern und dem Auftreten schwer bekämpfbarer Unkräuter begleitet (Hötte et al. 2010).

Die intensive landwirtschaftliche Flächennutzung ist vielfach mit hohem Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel verbunden. In Fruchtfolgen, in denen aus der Vorkultur bereits Überhänge aus der Stickstoffdüngung bestehen und nicht unmittelbar eine Folgefrucht angebaut wird, befinden sich unter Umständen große Mengen mineralischen Stickstoffs im Boden. Zudem können im Herbst durch Mineralisation weitere Stickstoffmengen hinzukommen. Werden diese sehr beweglichen Nährstoffe nicht gebunden, steigt die Gefahr, dass mit dem Beginn der winterlichen Sickerwasserperiode beachtliche Nitratmengen aus dem Boden ausgetragen werden. Die Eutrophierung von Gewässern sowie eine Verschlechterung der Trinkwasserqualität sind nur einige der auftretenden Risiken. Ziel muss es daher sein, die Austragung von Nitrat zu minimieren.

In Deutschland wurden hierzu juristische und politische Vorgaben formuliert. So sind in der Trinkwasserverordnung (Bundesministerium der Justiz 2001) neben anderen chemischen Substanzen auch die Grenzwerte für Nitrat ( $50 \text{ mg l}^{-1}$ ) im Grundwasser festgesetzt worden. Des Weiteren fordert die Wasserrahmenrichtlinie die Politik auf, einen guten Zustand der Grund- und Oberflächengewässer herbeizuführen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2010).

---

Somit lassen sich zwei besondere Herausforderungen politischer, ökologischer und juristischer Art benennen, die u. a. von der Landwirtschaft erfüllt werden sollen:

1. die Bereitstellung von Biomasse zur energetischen Nutzung, möglichst ohne weitere Intensivierung des Maisanbaues
2. die Reduzierung der Nitratbelastungen von Grund- und Oberflächengewässern

Ein Instrument zur Verminderung der winterlichen Stickstoffverlagerungen stellt der Anbau von Winterzwischenfrüchten dar. Im Allgemeinen werden Winterzwischenfrüchte vorwiegend zur Ackerbegrünung und zur Futternutzung angebaut (Lütke Entrup 2001). Neben der Verminderung von Sickerwasserbildung und Stickstoffverlagerung wird auch der Schutz vor Wind- und Wassererosion, die Unkrautunterdrückung, eine Förderung des Bodenlebens sowie die Lieferung energie- und eiweißreicher Futtermittel durch den Anbau von Winterzwischenfrüchten geschätzt. Doran & Smith (1991) erwähnen des Weiteren einen positiven Effekt auf Krankheits- und Schädlingsbefall durch höhere Pflanzen-Diversität.

Durch den Einbau von Stickstoff in die wachsende Pflanzenmasse wird dieser gespeichert; eine Verlagerung in tiefere Bodenschichten oder gar ins Grundwasser wird vermieden (Elers & Hartmann 1987, Lewan 1994, Vos et al. 1998, Isse et al. 1999, Lütke Entrup 2001, Thorup-Kristensen 2003). Da die Aufnahme von Nährstoffen und der Einbau in die Biomasse nur möglich sind, solange die Pflanzen (transpirativ) aktiv sind, ist es vorteilhaft, wenn die Pflanzen mineralisierten Stickstoff im Herbst möglichst rasch in die Biomasse aufnehmen. Die Aufnahme von Stickstoff setzt wiederum das Vorhandensein eines ausreichend entwickelten Wurzelsystems und das Vorhandensein von Pflanzenmasse voraus, in welche eingelagert werden kann (Thorup-Kristensen 2001). Dabei ist die Menge an Stickstoff, die gebunden werden kann, abhängig von der Wachstumsrate und der Stickstoff-Konzentration in der Pflanzenmasse (Vos et al. 1998).

In Klimazonen, in denen die Pflanzen eine Vegetationsruhe zeigen, sollte vor dieser Phase möglichst viel mineralisierter Stickstoff aus dem Boden in die Pflanze aufgenommen worden sein. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass aufgrund kürzer werdender Tageslängen mit einhergehend geringerer Einstrahlung im Herbst, die Wachstumsbedingungen häufig als nicht optimal anzusehen sind (Baeumer 1978). Dennoch wird vielfach die Stickstoff-Aufnahmefähigkeit der Winterzwischenfrüchte im Herbst nicht voll ausgeschöpft (Schröder et al. 1997). Für die effektive Speicherung des Stickstoffes über Winter ist des Weiteren eine ausreichende Winterhärte von großer Bedeutung, denn bei einem Absterben des Bestandes im frühen Winter kann es zu erneuter Freisetzung von bis zu 80% des bereits gebundenen Stickstoffs zu Vegetationsbeginn kommen (Berger et al. 1993).

---

Mit der Etablierung des Verfahrens zur Produktion von Elektrizität aus Biomasse mittels Biogasanlagen steht nunmehr neben der Nutzung als Gründüngung und Futter eine weitere Verwendungsrichtung für die Winterzwischenfrüchte zur Verfügung: die energetische Nutzung.

Als Basissubstrat zur Biogaserzeugung kommt in der Regel Flüssigmist (Gülle) zur Anwendung. Diesem Substrat werden biogene Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie und Landwirtschaft aber zunehmend auch nachwachsende Rohstoffe zugesetzt (Kaiser et al. 2004), da durch die Mitvergärung dieser Substrate der Methanertrag deutlich erhöht werden kann (Weiland 2000). Als Gärsubstrat können grundsätzlich alle Pflanzen eingesetzt werden, jedoch dürfen sie nur eine sehr geringe Lignifizierung aufweisen (Weiland 2004). Häufig wird für die Energiegewinnung bislang als sogenanntes Koferment Silomais eingesetzt. Aufgrund seiner Ertragssicherheit und der ausgereiften Anbau- und Erntetechnik ist der Maisanbau in der landwirtschaftlichen Praxis in der Regel fest eingeplant, ein Verzicht auf den Anbau des Maises ist häufig unerwünscht.

Insbesondere in Fruchtfolgen, in denen Energiemais nach einer vorausgehenden Körnerfrucht angebaut werden soll, könnte der Winterzwischenfruchtanbau die oben dargestellten Vorzüge offenbaren und hinsichtlich der Bereitstellung von Biomasse und der Nitratkonservierung eine Schlüsselstellung einnehmen. Über das Leistungsvermögen der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen als stickstoffbindende Winterbegrünung bei gleichzeitiger Lieferung energiereicher Biomasse, ohne dabei den Ertrag der nachfolgenden Zweitkultur zu schmälern, wurde bislang nur wenig berichtet.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen war es herauszuarbeiten, welche Winterzwischenfrüchte des mitteleuropäischen Anbaugebietes qualifiziert sind um

- viel mineralisierten Bodenstickstoff im Herbst zu binden und dadurch vor einer Verlagerung in größere Bodentiefen zu bewahren,
- im Winterhalbjahr eine beträchtliche Biomasse für die Verwendung in Biogasanlagen zu produzieren,
- günstige Vorfruchteffekte auf den nachfolgendem Mais auszuüben.

Es soll versucht werden, diese drei Merkmale in einem Index zu aggregieren um so die relative Anbauwürdigkeit der geprüften Winterzwischenfrüchte zu rangieren.

## 2 Material und Methoden

Die Feldversuche wurden auf den Flächen des Versuchsgutes „Reinshof“ der Universität Göttingen im Winterhalbjahr 2006/2007 und im Winterhalbjahr 2007/2008 durchgeführt. Der Reinshof liegt südlich von Göttingen, etwa 4 km vom Zentrum. Die Koordinaten der Versuchsflächen sind 9°55' östlicher Länge und 51°3' 2' nördlicher Breite bei etwa 160 m über NN.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag bei den geprüften Winterzwischenfrüchten (Winterhalbjahr 2006/2007 und 2007/2008), während die Daten des nachgebauten Energiemaisses (Sommerhalbjahr 2007 und 2008) weitergehende Auswirkungen der Winterzwischenfrüchte auf die Folgekultur aufzeigen sollten.

### 2.1 Versuchsstandorte

Der Feldversuch zu den Winterzwischenfrüchten wurde im ersten Versuchsjahr (2006/2007) auf den Schlag „Am Leinekamp“ durchgeführt. Bei diesem Standort handelt es sich um einen tiefgründigen Lössboden vom Bodentyp „Brauner Auenboden“. Im zweiten Versuchsjahr 2007/2008 wurde auf dem Schlag „Wüstes Land“ ausgesät. Auch bei dieser landwirtschaftlichen Fläche handelt es sich um einen tiefgründigen Lössboden. Der Bodentyp ist hier „Grauer Auenboden“. Die Analyse des Oberbodens zu Versuchsbeginn ergab mittlere Versorgungstufen der Makronährstoffe in einem schwach alkalischen bzw. schwach sauren Boden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bodenkennwerte der beiden Versuchsstandorte zu Versuchsbeginn.

Versuchsjahr	Bodenart	C <sub>org</sub> [%]	Gesamt N [%]	C/N	Humus [%]	pH	P*	K*	Mg*
2006/2007	tL	1,30	0,15	9	2,2	7,4	7,0	14,0	7,0
2007/2008	L	1,27	0,15	8	2,2	6,7	6,5	10,5	9,5

\* Angaben für Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg) im mg/100 g trockenem Boden

## 2.2 Witterung im Versuchszeitraum

Die Witterungsdaten wurden von der Wetterstation „Göttingen“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erfasst; diese liegt etwa drei Kilometer vom Versuchsstandort entfernt. In Göttingen wurden im langjährigen Mittel (1961 bis 1990) eine Temperatur von 8,7 °C und eine Niederschlagsmenge von 645 mm gemessen.

Die Niederschläge im ersten Versuchsjahr, vom August 2006 bis Mai 2007, wichen deutlich von den Werten des langjährigen Mittels ab (Abbildung 1). Im September 2006 fielen nur 6 mm Niederschlag, das sind 44 mm Niederschlag weniger als im langjährigen Mittel. Im November und Dezember fielen ebenfalls weniger Niederschläge; im Januar hingegen war die Niederschlagsmenge größer als im langjährigen Mittel. Im April 2007 fielen 3,1 mm Niederschlag, der Wert des langjährigen Mittels für den Monat April beträgt 48,5 mm. Im Februar 2007 (95 mm Niederschlag) fielen 47 mm Niederschlag mehr, im Mai 07 (120 mm Niederschlag) 61 mm Niederschlag mehr als im langjährigen Mittel. Insgesamt fielen während des Versuchszeitraumes von August 2006 bis Mai 2007 525 mm Niederschlag, dieses sind 24 mm Niederschlag mehr als im langjährigen Mittel.

Die Niederschlagsmengen des zweiten Versuchsjahres 2007/2008 sind gekennzeichnet durch hohe Niederschläge im August 2007 und September 2007 (95 mm Niederschlag gegenüber 60 mm Niederschlag bzw. 127 mm Niederschlag gegenüber 50 mm Niederschlag im langjährigen Mittel). In den Monaten vor der Durchführung des Versuches war

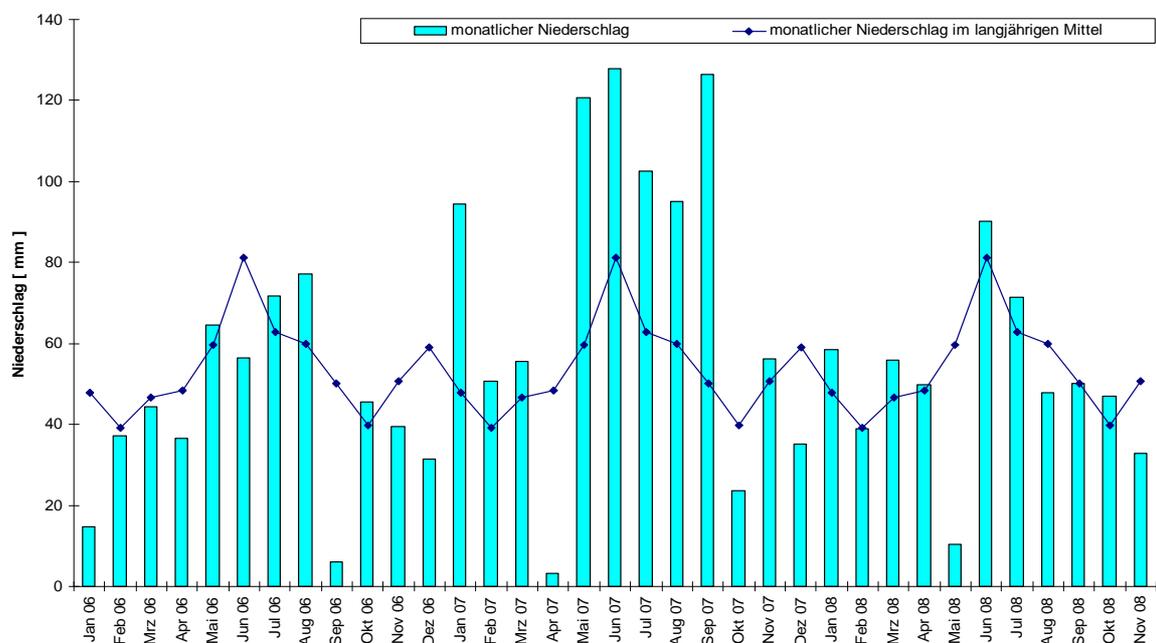


Abbildung 1: Niederschlag als Monatssummen im Versuchszeitraum und im langjährigen Mittel.

ebenfalls schon überdurchschnittlich viel Niederschlag gefallen. Der Niederschlag im Monat Mai 2008 (10 mm Niederschlag) war um 49 mm geringer als der Niederschlagswert im langjährigen Mittel. Insgesamt fielen im zweiten Versuchsjahr vom August 2007 bis zum Mai 2008 550 mm Niederschlag (gegenüber 501 mm Niederschlag im langjährigen Mittel des gleichen Zeitraumes).

Die Lufttemperaturen am Versuchsstandort waren im ersten Versuchsjahr geprägt durch einen sehr milden Herbst, milden Winter und ebenfalls milden Frühling. Die Mittelwerte der gemessenen Temperaturdaten lagen in diesem Versuchszeitraum in jedem Monat über dem langjährigen Mittel (Abbildung 2). Phasen mit anhaltendem Frost über einen Zeitraum von einer Woche oder länger wurden nicht gemessen. Die niedrigste Tagestemperatur wurde am 24. Januar 2007 mit  $-4,8\text{ °C}$  gemessen.

Im zweiten Versuchsjahr waren die Lufttemperaturen im Herbst (2007) nur leicht geringer als im langjährigen Mittel (maximale Abweichung waren  $0,7\text{ °C}$  im Oktober 2007). Die Wintermonate (Dezember 2007, Januar 2008, Februar 2008 und März 2008) waren auch in diesem Versuchsjahr überdurchschnittlich warm. Im zweiten Versuchsjahr betrug die geringste Lufttemperatur in Tagesdurchschnitt  $-4,5\text{ °C}$  (am 20. Dezember 2007).

Insgesamt war die Witterung in beiden Versuchszeiträumen 2006/2007 und 2007/2008 deutlich milder als im langjährigen Mittel mit nur mäßigen Frostereignissen in den Wintermonaten.

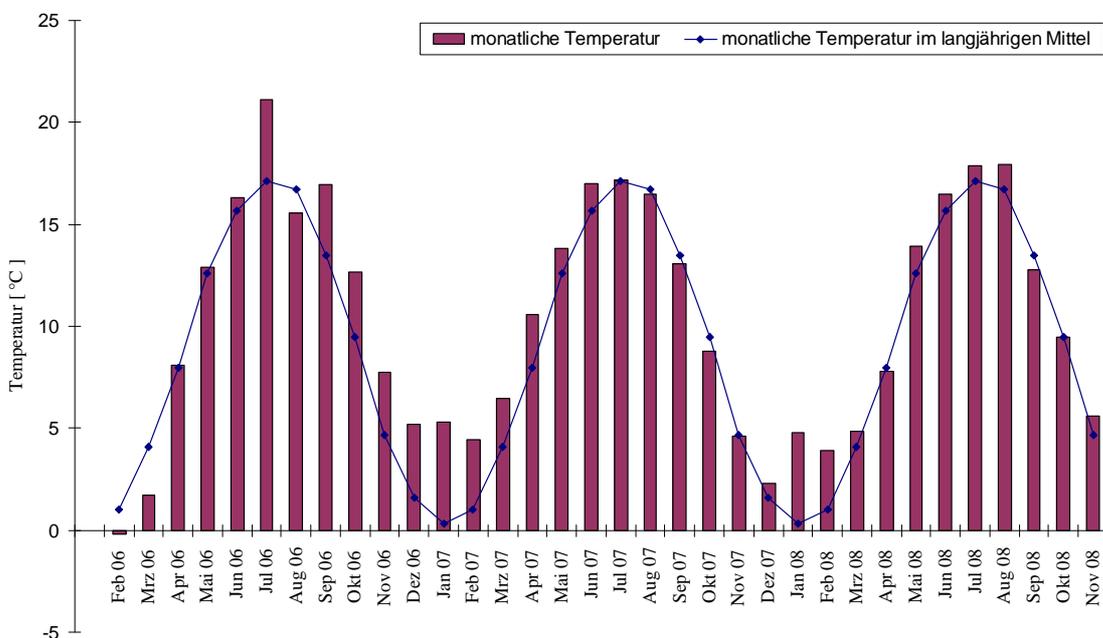


Abbildung 2: Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur im Versuchszeitraum und Lufttemperaturen im langjährigen Mittel.

## 2.3 Versuchsanlage

Das Design des Versuches war eine Blockanlage mit vier Wiederholungen (Abbildung 4). Jede der Parzellen bestand aus drei nebeneinander liegenden Beeten mit einer Breite von je 1,50 m bei 8 Metern Länge (Abbildung 3). Von diesen Beeten wurden die Winterzwischenfrüchte von nur einem der Beete beprobt, die zwei übrigen Beete blieben unangekostet; sie dienten dem nachfolgenden zweiten Abschnitt des Feldversuches, bei dem es um den Nachbau des Energiemaisses ging. Hierzu sollte der Mais auf Boden wachsen, welcher nicht zuvor durch die Arbeitsgänge bei den Beprobungen der Winterzwischenfrüchte beeinflusst worden war. Die Probennahmen innerhalb des Beetes wurden auf kleinen Teilflächen von 0,66 m<sup>2</sup> (Miniplots) durchgeführt, die jeweils vor dem Schnitt der Sprossmasse eingemessen wurden.

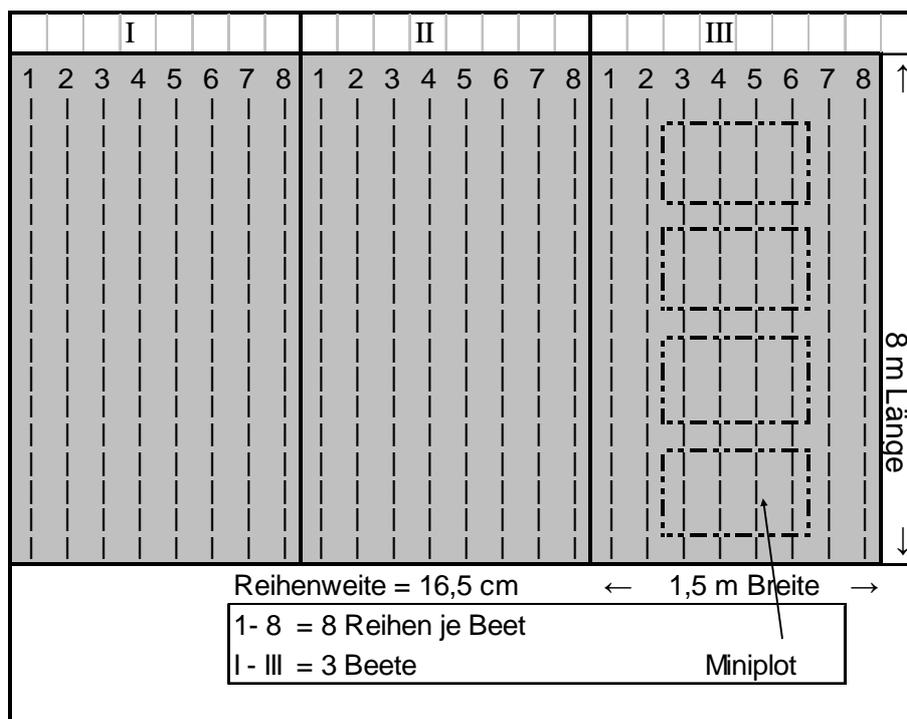


Abbildung 3: Skizze einer Versuchsparzelle

---

## 2.4 Versuchsdurchführung

Die Flächen wurden konventionell bewirtschaftet. In beiden Jahren standen die Winterzwischenfrüchte in der Fruchtfolge nach Winterweizen. Das Stroh des Weizens blieb nach der Ernte des Getreides gehäckselt auf dem Feld zurück und wurde mit einem Grubber eingearbeitet. Vor der Aussaat wurde die Versuchsfläche flach gepflügt und anschließend mit einer Kreiselegge für die Aussaat vorbereitet. Gesät wurde mit einer selbstfahrenden, achtreihigen Drillmaschine vom Typ „Öyord“. Die Maschine war mit Schleppscharen ausgerüstet, die das Saatgut 3 cm tief ablegten. Die Reihenweite betrug 16,5 cm. Ausgesät wurde an zwei Terminen; die Aussaat von Futtergrasarten, Kreuzblütlern, Kräutern und kleinkörnigen Leguminosen erfolgte Mitte August (17. August 2006 bzw. 13. August 2007), die übrigen Varianten wurden ab Ende September gesät (25. September 2006 bzw. 17. Oktober 2007; Tabelle 2). Im zweiten Versuchsjahr ergab sich bei der späten Aussaat aufgrund fortwährenden Regens eine Verzögerung, sodass hier die späte Saat nicht wie geplant um den 25. September 2007, sondern erst am 17. Oktober 2007 erfolgen konnte.

Zur Vermeidung einer Stickstoffimmobilisierung durch die eingearbeiteten Strohreste der Vorkultur, wurde nach der Aussaat im August eine Stickstoff-Ausgleichsgabe von 30 kg N ha<sup>-1</sup> als Kalkammonsalpeter (27 % N) mit einem Düngerstreuer ausgebracht.

Zur Unkrautregulierung in den Zwischenfruchtparzellen wurde in beiden Jahren zweimal mit der Handhacke gehackt; chemische Präparate zur Unkrautbekämpfung wurden zur Winterzwischenfrucht nicht eingesetzt. Vorbeugend gegen Schneckenfraß wurde bei Auftreten von ersten Nacktschnecken 3 kg ha<sup>-1</sup> eines Molluskizides („Metarex“, Wirkstoff: 49 g kg<sup>-1</sup> Metaldehyd) ausgebracht. Zur Abwehr von Wildtieren wurde der gesamte Versuch ca. 1 m hoch eingezäunt. Die Versuchsanlage war in beiden Jahren gleich.

## 2.5 Versuchsglieder

Angebaut wurden winterharte Futtergrasarten, Wintergetreide, Kreuzblütler, Leguminosen und Kräuter. Einige Pflanzenarten wurden zusätzlich zur Reinsaat auch im Gemenge geprüft (Tabelle 2). Bei Winterroggen, Wintergerste und Winterraps wurden jeweils vier Sorten geprüft. Einen Überblick über die Saatstärken gibt Tabelle 4.

4. Wiederhol.	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146	145	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125	124	123	122	121	120	119	118
	4	6	3	8	2	7	10	5	1	9	39	37	32	38	36	33	35	31	34	22	26	30	24	28	25	21	23	29	27	15	11	19	13	18	12	16	20	17	14
3. Wiederhol.	117	116	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106	105	104	103	102	101	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79
	25	23	26	29	21	28	24	27	30	22	16	13	19	12	17	11	14	20	15	18	8	2	6	10	5	9	3	1	4	7	39	36	32	35	33	37	34	31	38
2. Wiederhol.	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
	13	19	14	18	16	20	11	15	17	12	4	7	5	1	9	3	8	2	10	6	34	32	35	31	37	39	36	38	33	23	21	26	30	27	25	28	22	29	24
1. Wiederhol.	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

**N < > S**

1.- 4. Wiederhol. = 4 Wiederholungen      **1-156** = Parzellennummerierung  
 1 - 39 = Varianten

Abbildung 4: Versuchsplan. Die Varianten 35 bis 39 wurden in der Versuchsordnung als Duplikate der Varianten 1, 5, 14, 23 und 33 angelegt; diese Duplikate wurden als Düngungs-Varianten für den nachfolgenden Energiemaissversuch benötigt, sie sind in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Liste der geprüften Winterzwischenfrucht-Varianten.

Nr.	Variante	Botanische Bezeichnung	Sorte bzw. Linie	Saat-termin
1	Deutsches Weidelgras	<i>Lolium perenne</i>	Loporello	F
2	Welsches Weidelgras	<i>Lolium multiflorum</i>	Gisel	F
3	Bastard-Weidelgras	<i>Lolium hybridum</i>	Aberanvil	F
4	Knaulgras	<i>Dactylis glomerata</i>	Treposno	F
5	Winterroggen	<i>Secale cereale</i>	Vitallo	S
6	Winterroggen	<i>Secale cereale</i>	Recrut	S
7	Winterroggen	<i>Secale cereale</i>	Carotrumpf	S
8	Winterroggen	<i>Secale cereale</i>	Resonanz	S
9	Wintergerste	<i>Hordeum vulgare</i>	Ludmilla	S
10	Wintergerste	<i>Hordeum vulgare</i>	Doroathea	S
11	Wintergerste	<i>Hordeum vulgare</i>	Reni	S
12	Wintergerste	<i>Hordeum vulgare</i>	Mombasa	S
13	Wintertriticale	<i>Triticale</i>	SW Talentro	S
14	Winterraps	<i>Brassica napus</i>	Mikonos	F
15	Winterraps	<i>Brassica napus</i>	Oase	F
16	Winterraps	<i>Brassica napus</i>	Talent	F
17	Winterraps	<i>Brassica napus</i>	„Becker“ <sup>1</sup>	F
18	Winterrübsen	<i>Brassica rapa</i>	Lenox	F
19	Markstammkohl	<i>Brassica oleracea</i>	Markola	F
20	Wegwarte	<i>Cichorium intybus</i>	Puna	F
21	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	Französisches Handelssaatgut	F
22	Winterackerbohnen	<i>Vicia faba</i>	WAb 98-21 <sup>2</sup>	S
23	Wintererbsen	<i>Pisum sativum</i>	EFB 33	S
24	Zottelwicken	<i>Vicia villosa</i>	Otsaat	F
25	Gelber Steinklee	<i>Melilotus officinalis</i>	Kanadisches Handelssaatgut	F
26	Rotklee	<i>Trifolium pratense</i>	Maro	F
27	Inkarnatklee	<i>Trifolium incarnatum</i>	Linkarus	F
28	Gemenge Wicken/Roggen	<i>Vicia villosa</i> <i>Secale cereale</i>	Otsaat Vitallo	F
29	Gemenge Ackerbohnen/Erbsen	<i>Vicia faba</i> <i>Pisum sativum</i>	WAb 98-21 <sup>2</sup> EFB 33	S
30	Gemenge Rübsen/Markstammkohl	<i>Brassica rapa</i> <i>Brassica oleracea</i>	Lenox Markola	F
31	Gemenge Winterraps/Wegwarte	<i>Brassica napus</i> <i>Cichorium intybus</i>	„Becker“ <sup>1</sup> Handelssaatgut	F
32	Gemenge Triticale/ Spitzwegerich	<i>Triticale</i> <i>Plantago lanceolata</i>	SW Talentro Handelssaatgut	S
33	Landsberger Gemenge Welsches Weidelgras/ Zottelwicke/ Inkarnatklee	<i>Lolium multiflorum</i> <i>Vicia villosa</i> <i>Trifolium incarnatum</i>	Gisel Otsaat Linkarus	F
34	Schwarzbrache		-	

<sup>1</sup> Zuchtlinie von Professor Becker, Göttingen; im Jahr 2006: MSL Express x DH 285; im Jahr 2007: MSL Express x DH 126; <sup>2</sup> Zuchtlinie von Professor Link, Göttingen; F = Frühe Aussaat (17. August 2006 bzw. 13. August 2007); S = Späte Aussaat (25. September 2006 bzw. 17. Oktober 2007).

Im folgenden Text werden gelegentlich einige Versuchsvarianten aus Gründen der übersichtlicheren Darstellung zu einer „Pflanzengruppe“ zusammengefasst. Einen Überblick über die Zuordnung gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht über die Gruppierung der Versuchsvarianten zu Pflanzengruppen.

Bezeichnung Pflanzengruppe	Enthaltene Versuchsvarianten
Futtergrasarten	1, 2, 3, 4
Wintergetreide	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
Kreuzblütler	14, 15, 16, 17, 18, 19
Kräuter	20, 21
Leguminosen	22, 23, 24, 25, 26, 27
Gemenge	28, 29, 30, 31, 32, 33
Nicht-Leguminosen	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13, 14,15,16,17,18,19,20,21
<b>Leguminosen</b>	
Großkörnige Leguminosen	22, 23
Kleinkörnige Leguminosen	24, 25, 26, 27

Tabelle 4: Saatstärke, Tausendkorngewicht (TKG) und Keimfähigkeit der Winterzwischenfrüchte.

Nr.	Variante	Saatstärke [Körner/m <sup>2</sup> ]	TKG* [g]	Keimfähigkeit* [%]
1	Deutsches Weidelgras	2000	2,9	90
2	Welsches Weidelgras	1500	3,9	90
3	Bastard-Weidelgras	2000	3,4	87
4	Knautgras	1500	1,0	90
5	Winterroggen	300	41,4	90
6	Winterroggen	300	30,8	90
7	Winterroggen	300	32,5	93
8	Winterroggen	300	39,1	90
9	Wintergerste	300	54,0	94
10	Wintergerste	300	44,0	98
11	Wintergerste	300	62,0	98
12	Wintergerste	300	57,0	94
13	Wintertriticale	300	47,1	92
14	Winterraps	200	3,9	90
15	Winterraps	200	4,8	90
16	Winterraps	200	7,9	90
17	Winterraps	200	7,1	90
18	Winterrübsen	200	4,5	90
19	Markstammkohl	100	4,7	90
20	Wegwarte	600	1,4	90
21	Spitzwegerich	600	1,6	90
22	Winterackerbohnen	50	540,0	90
23	Wintererbsen	70	120,6	98
24	Zottelwicken	300	32,0	90
25	Gelber Steinklee	400	2,1	90
26	Rotklee	1000	2,9	90
27	Inkarnatklee	1000	4,1	90
28	Gemenge Wicken/Roggen	225/225	32,0/41,4	90/90
29	Gemenge Ackerbohnen/Erbsen	38/53	540,0/120,6	90/98
30	Gemenge Rübsen/Markstammkohl	150/75	4,5/4,7	90/90
31	Gemenge Winterraps/Wegwarte	150/450	7,1/1,4	90/90
32	Gemenge Triticale/ Spitzwegerich	225/450	47,1/1,6	92/90
33	Landsberger Gemenge Welsches Weidelgras/ Zottelwicken/ Inkarnatklee	750 150 500	3,9 32,0 4,1	90 90 90

\* Die Werte des Tausendkorngewichtes und der Keimfähigkeit entstammen den Angaben der Saatgutproduzenten.

## 2.6 Datengewinnung

An mehreren Terminen während der Versuchsphase wurden bei den Winterzwischenfrüchten die oberirdische Biomasse, das Wurzelwachstum und die Nmin-Werte im Boden erfasst. Nachfolgend werden die Vorgehensweisen bei den genannten Beprobungen dargelegt.

### 2.6.1 Termine der Beprobungen

Die oberirdische Biomasse der Winterzwischenfrüchte wurde an vier Terminen erfasst (Tabelle 5). Des Weiteren wurden an diesen Terminen und zur Aussaat auch Nmin-Proben und an den Terminen im Dezember und Mai zusätzlich Wurzelproben gewonnen.

Tabelle 5: Beprobungstermine.

Vorgang	Datum	Beprobungen
Erstes Versuchsjahr		
1. Biomasse-Ernte	04. Dezember 2006	Nmin- und Wurzelbeprobung
2. Biomasse-Ernte	05. März 2007	Nmin
3. Biomasse-Ernte	16. April 2007	Nmin
4. Biomasse-Ernte	21. Mai 2007	Nmin- und Wurzelbeprobung
Ernte des Energiemaisses	05. November 2007	Nmin
Zweites Versuchsjahr		
1. Biomasse-Ernte	12. Dezember 2007	Nmin- und Wurzelbeprobung
2. Biomasse-Ernte	10. März 2008	Nmin
3. Biomasse-Ernte	16. April 2008	Nmin
4. Biomasse-Ernte	20. Mai 2008	Nmin- und Wurzelbeprobung
Ernte des Energiemaisses	03. November 2008	Nmin

### 2.6.2 Gewinnung der Sprossdaten

Die Ernte der Sprossmasse erfolgte auf einer Teilfläche im mittleren Bereich der Ernteparzellen. Um Randeffekte zu minimieren wurde ein Abstand vom Stirnrand bzw. bei den nachfolgenden Erntedurchgängen von der bereits beernteten Teilfläche von mindestens 50 cm eingehalten. Es wurde der Aufwuchs von vier nebeneinander liegenden Reihen, auf einer Länge von einem Meter (Abbildung 3), bodennah mit Messern abgeschnitten und in Erntesäcke verpackt. Bei den Erntedurchgängen im April und Mai wurden zum Teil auch Gartenscheren eingesetzt, da einige Varianten aufgrund einsetzender Lignifizierung mit dem Messer nicht mehr zu ernten waren. Die gewonnenen Pflanzenproben wurden anschließend sortiert. Es wurden kleinere Erdanhaftungen und sporadisch enthaltene Beikräuter entfernt. Außerdem wurde bei den Gemenge-Varianten eine Trennung der

einzelnen Pflanzenarten voneinander durchgeführt. Beim Gemenge aus Rüben und Markstammkohl wurde aufgrund der schwierigen Unterscheidbarkeit auf die Trennung verzichtet. Nach der Sortierung wurden die Frischmassen gewogen (Laborwaage der Firma Satorius; Typ BP 34000 P,  $\pm 0,1$  g).

Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden die Proben gehäckselt (Häcksler der Firma Walter & Wintersteiger, Typ LH 120, Häcksellänge  $\leq 3$  cm) und es wurden je Probe zwei aliquote Teile für die Trocknung (Trockenschrank der Firma Memmert, Typ ULE/ULM 800) eingewogen (Laborwaage der Firma Satorius, Typ TE 1502 S,  $\pm 0,01$  g). Für die Analyse der Inhaltstoffe wurde eine der Teilproben bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Für die C/N-Analyse wurde das getrocknete Pflanzenmaterial mit einer Zentrifugalmühle (Firma Retsch, Typ ZM, Maschenweite 0,2 mm) vermahlen. Die C/N-Werte wurden mittels eines C/N-Analysegerätes (Firma Elementar, Typ Vario EL) ermittelt. Eine zweite Teilprobe wurde bei 105 °C ebenfalls bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wurde diese Teilprobe zurück gewogen (Laborwaage der Firma Satorius, Typ TE 1502 S,  $\pm 0,01$  g) und der Trockenmassegehalt der Pflanzenprobe berechnet.

### **2.6.3 Gewinnung der Wurzeldaten**

Die Entnahme der Wurzelproben erfolgte in der Miniplotfläche auf der zuvor die Sprossmasse geerntet wurde. Zur Durchführung der Wurzelprobe-Entnahmen wurden Rammkernsonden (Firma Stitz, Zylinderdurchmesser 8,7 cm) verwendet. Es erfolgte auf jeder Parzelle ein Einstich auf der Pflanzenreihe und ein Einstich zwischen zwei beernteten Pflanzenreihen. Die Zylinder wurden mittels eines elektrisch betriebenen Bohrhammers (Firma Hilti) in den Boden getrieben, anschließend von Hand aus dem Boden gehoben und auf ein Stativ horizontal abgelegt. Nachfolgend wurden die oberen 30 cm der Bodensäule und bei der Beprobung im Mai zusätzlich die Bodensäule von 30 cm bis 60 cm dem Zylinder entnommen und in Säcke verpackt. Die Separation von Boden und Wurzeln erfolgte mittels einer Wurzelwaschanlage (Firma UP; Maschenweite 1 mm) und anschließendem Herauslesen von kleinen Steinchen und organischem Fremdmaterial (überwiegend Reste vom Weizenstroh der Vorkultur). Die Wurzeln wurden anschließend in Teebeutel (Firma Cilia) verpackt und in einer Tiefkühltruhe bei -18 °C zwischengelagert.

Zur Ermittlung der Wurzellängen wurden die Wurzeln auf einem Durchlichtscanner eingescannt (Firma Epson, Typ Perfektion 700 PHOTO) und anschließend mit dem Computerprogramm WinRHIZO (WinRHIZO Reg.V.2007d; Firma Regent Instruments) automatisch vermessen. Wichtig war hierbei, dass die Wurzelabschnitte sich beim Scanvorgang nicht überlagerten, da bedingt durch die zweidimensionale Arbeitsweise des Scanners ansonsten Teile der Wurzeln nicht erfasst worden wären. Zur Vermeidung dieser Überdeckungen wurden die Wurzelproben in wassergefüllte Plexiglasschalen gegeben und mit Pinzetten nebeneinander gelegt. Aufgrund der aufwändigen Vorbereitungen für die Vermessung der Wurzeln, wurden die im Mai genommenen Proben nicht in vollem Umfang untersucht; Proben welche voraussichtlich mehr als fünf Plexiglasschalen bedurft

---

hätten, wurden zunächst gewogen (Laborwaage der Firma Satorius, Typ TE 1502 S,  $\pm 0,01$  g), danach wurde ein repräsentativer Teil zur Untersuchung entnommen. Der Rest wurde erneut gewogen und mittels der ermittelten Bruchteile wurden die gemessenen Wurzelanteile auf die Gesamtprobe hochgerechnet.

Die im Nachfolgenden dargestellten Werte zur Wurzellängendichte entstammen der genannten Wurzelanalyse. Die ermittelten Wurzellängen aus den Einstichen auf bzw. zwischen zwei Pflanzenreihen wurden auf das Volumen des Probenzylinders ( $1783,40 \text{ cm}^3$ ) bezogen, um die Wurzellängendichte (WLD) zu bestimmen. Die nachfolgend genannten Wurzellängendichten beziehen sich auf Mittelwerte der Einstiche „auf der Reihe“ und „zwischen zwei Reihen“.

Nach der Vermessung der Wurzeln wurden diese zur Bestimmung der Trockenmasse im Trockenschrank (Firma Memmert, Typ ULE/ULM 800) bei  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gewogen (Laborwaage der Firma Satorius, Typ TE 1502 S,  $\pm 0,01$  g). Für die C/N-Analyse wurde das getrocknete Pflanzenmaterial mit einer Zentrifugalmühle (Firma Retsch, Typ ZM, Maschenweite  $0,2 \text{ mm}$ ) vermahlen und im C/N-Analysegerät untersucht.

#### **2.6.4 Nmin-Beprobung**

Zur Gewinnung von Bodenmaterial für die Ermittlung der vorhandenen Stickstoffverbindungen Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4$ ), wurden mittels zweier handgeführter Beprobungswagen (Firma Nietfeld) Bodenproben gezogen. Die montierten Pürckhauer-Bohrstöcke wurden dabei mit Unterstützung durch einen elektrischen Schlaghammer (Firma Hilti) bis ca.  $0,95 \text{ m}$  in den Boden getrieben und anschließend mit einer elektrischen Winde (Firma Roller) aus dem Boden gezogen. Die gewonnene Probe wurde in drei Tiefenstufen von  $0 \text{ cm}$  bis  $30 \text{ cm}$ ,  $30 \text{ cm}$  bis  $60 \text{ cm}$  und  $60 \text{ cm}$  bis  $90 \text{ cm}$  getrennt, in Polyethylen-Beutel abgefüllt und in Kühltaschen aufbewahrt. Es wurden je Beet zwei Einstiche auf den Pflanzenreihen und zwei Einstiche zwischen zwei benachbarten Pflanzenreihen durchgeführt. Die Erdproben der gleichen Tiefenstufe eines Beetes wurden zu einer Mischprobe vereinigt. Die erste Probennahme (Start-Nmin) erfolgte im vorderen Bereich eines jeden Beetes, ca.  $0,80 \text{ m}$  vom Rand; bei späteren Probenahmen wurde stets die Miniplot-Fläche zur Beprobung gewählt, die unmittelbar vorher beerntet worden war. Aufgrund der sehr feuchten Bodenverhältnisse über mehrere Wochen des zweiten Versuchsjahres konnte nicht bei allen Beprobungsterminen das System Nietfeld eingesetzt werden, da die Befahrung mit den Wagen nicht möglich war. An diesen Terminen wurde die Gewinnung der Bodenproben manuell durchgeführt.

Die gewonnenen Bodenproben wurden unmittelbar im Anschluss an die Probennahme in einer mit Stahlborsten ausgestatteten Mühle (Firma Fritzmeier) zerkleinert und homogenisiert. Bis zur Analyse wurden die Proben bei  $-18\text{ °C}$  in Tiefkühltruhen gelagert.

Im Labor der Abteilung Pflanzenbau wurden die Bodenproben untersucht. Aus dem gewonnenen Probenmaterial wurden 100 g Boden entnommen und mit 250 ml einer 0,01-molaren Calciumchloridlösung ( $\text{CaCl}_2$ ) versetzt. Diese Lösung wurde eine Stunde geschüttelt und anschließend filtriert. Das Filtrat wurde zunächst eingefroren und in einem anschließenden Arbeitsschritt spektrometrisch (Flow Solution III, Firma Perstorp Analytical) auf die Gehalte an Nitrat und Ammonium untersucht. Ein weiterer Anteil der Bodenproben wurde zur Bestimmung der Trockenmasse in Kunststoffgefäße eingewogen und mindestens 24 Stunden bei einer Temperatur von  $105\text{ °C}$  getrocknet und anschließend zurück gewogen.

Unter  $N_{\text{min}}$  wird im Folgenden die Summe  $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$  verstanden, angegeben in  $\text{kg N ha}^{-1}$ .

## 2.7 Methangehalt und Methanertrag

Der Methangehalt wurde in praktischen Gärversuchen durch die Anwendung des „Hohenheimer Biogasertragstestes“ (HBT) ermittelt (Helffrich & Oechsner 2003). Hierbei wurden Materialproben in Glaszylinder (Kolbenprober) mit einem Volumen von 100 ml eingebracht. Zur Durchführung der Analyse wurden 500 mg des zu prüfenden Materials mit einem TM-Gehalt von mindestens 85% benötigt. Das Material wurde zusammen mit einem Impfsubstrat, welches die Mikroorganismen zur Produktion des Biogases enthielt, in den Glaszylinder gegeben und mit einem Kolben gasdicht verschlossen. Eine Skala am Kolbenprober ermöglichte das Ablesen des entstandenen Gasvolumens. Die Kolbenprober wurden nach dem Befüllen in temperierten Schränken bei  $37\text{ °C}$  gelagert, in diesen verblieben sie, bis kaum noch Gas entstand. Die Analysen wurden am „Landwirtschaftlichen Labor Dr. Janssen GmbH“, Gillersheim (Kreis Göttingen) durchgeführt.

Zur Bestimmung der spezifischen Methanerträge der Winterzwischenfrüchte zum Zeitpunkt der Beerntung im Mai, wurden die Varianten 1 bis 27 aus dem Versuchsjahr 2007/2008 mit je zwei Proben aus unterschiedlichen Wiederholungen geprüft, aus den beiden Ergebnisdaten wurde der Mittelwert der Variante errechnet.

Zur Berechnung der Methan-Flächenerträge ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ha}^{-1}$ ) wurden die TM-Erträge der Parzellen mit den spezifischen Methanerträgen multipliziert. Bei den Gemengen des Versuches wurden die TM-Erträge der einzelnen Gemengepartner mit den entsprechenden Werten der spezifischen Methanerträge für die Reinsaat (Varianten 1 bis 27) errechnet. Die Methan-Flächenerträge der Ernte im Mai 2007 wurden mit den Analyseergebnissen für die Proben vom Mai 2008 berechnet.

## 2.8 Abschätzung des symbiotisch fixierten Stickstoffs

Die Berechnung der Stickstoffmengen, die von den Leguminosen-Varianten in Reinsaat durch symbiotische Fixierung aufgenommen wurden, erfolgte mittels der erweiterten Differenzmethode (Stülpnagel 1982). Zur Abschätzung der Fixierleistung wird bei dieser Methode die Stickstoffmenge in der Sprossmasse einer Leguminose mit der Stickstoffmenge in der Sprossmasse einer Nicht-Leguminose (= Referenzpflanze) verglichen. Des Weiteren wird die Veränderung des Stickstoffvorrats im Boden ( $N_{\min}$ ) von Leguminose und Referenzpflanze berücksichtigt. So wird z.B. eine höhere Fixierung angenommen, wenn der  $N_{\min}$ -Wert bei der Referenzpflanze geringer war als der  $N_{\min}$ -Wert der Leguminose.

Folgende Formel wurde zur Berechnung des symbiotisch fixierten Stickstoffs verwendet:

$$N_{\text{fix}} = (N_{\text{Leg}} - N_{\text{Ref}}) + (N_{\min_{\text{Leg}}} - N_{\min_{\text{Ref}}})$$

- $N_{\text{fix}}$  = symbiotisch fixierte Stickstoffmenge [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]  
 $N_{\text{Leg}}$  = Stickstoffmenge in der Spross-TM der Leguminose [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]  
 $N_{\text{Ref}}$  = Stickstoffmenge in der Spross-TM der Referenzpflanze [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]  
 $N_{\min_{\text{Leg}}}$  =  $N_{\min}$ -Wert der Leguminose [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]  
 $N_{\min_{\text{Ref}}}$  =  $N_{\min}$ -Wert der Referenzpflanze [ $\text{kg N ha}^{-1}$ ]

Die Berechnung des symbiotisch fixierten Stickstoffs erfolgte an sechs Varianten zur Ernte im Mai 2007 und Mai 2008 (Tabelle 6).

Tabelle 6: Leguminosen-Varianten und Referenzpflanzen, die zur Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge dienten.

Variante	Referenzpflanze
22 Winterackerbohnen	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)
23 Wintererbsen	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)
24 Zottelwicken	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)
25 Gelber Steinklee	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)
26 Rotklee	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)
27 Inkarnatklee	14 Winterraps (Sorte „Mikonos“)

Die Relation von symbiotisch fixierter Stickstoffmenge zur Gesamtstickstoffmenge der Variante wurde anschließend als  $N_{\text{dfa}}$  [%] (Nitrogen derived from the atmosphere) errechnet.

## 2.9 Ligningehalt

Die Bestimmung der Ligningehalte erfolgte mit einem Fiber Analyser (Typ ANKOM<sup>220</sup>; Firma ANKOM Technology). Bei diesem Verfahren wird zunächst Lignozellulose durch die Behandlung der Proben mit kationischen Detergentien isoliert. In einem weiteren Schritt wird nach der Behandlung der Lignozellulose mit konzentrierter Schwefelsäure der Ligningehalt bestimmt (van Soest et al. 1991). Die Analysen wurden an der Abteilung Tierernährungsphysiologie der Universität Göttingen durchgeführt.

Der Ligningehalt der Winterzwischenfrüchte wurde bei einer Auswahl von Varianten der Erntetermine April 2008 und Mai 2008 bestimmt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Winterzwischenfrüchte für die Ligninbestimmung.

Nr. Variante	
2	Welsches Weidelgras
5	Winterroggen
14	Winterraps
18	Winterrüben
20	Wegwarte
21	Spitzwegerich
24	Zottelwicken
27	Inkarnatklie

## 2.10 Energiemais

Nach der letzten Beprobung der Winterzwischenfrüchte wurde der noch verbliebene Aufwuchs mit einem Mähwerk geschnitten und vom Feld entfernt. Der Boden wurde gepflügt und mit einer Kreiselegge für die Maisaussaat bearbeitet. Es wurde am 5. Juni 2007 bzw. am 26. Mai 2008 Energiemais der Sorte „Atletico“ (S 280, Firma KWS SAAT AG) mit einer Saatstärke von 13 Körnern je m<sup>2</sup> in Reihenweiten von 0,75 m ausgesät. Das Saatgut war gebeizt mit dem Insektizid „Poncho“, das Aufbringen von Herbiziden (0,5 l ha<sup>-1</sup> „Certrol“ plus 1,0 l ha<sup>-1</sup> „Clic“) erfolgte am 6. Juni 2007 bzw. am 30. Juni 2008. Zum Mais wurde nicht gedüngt.

Die Ernte des Mais erfolgte manuell. Der Mais der beiden mittleren Reihen jener zwei Beete, welche nicht bei der Winterzwischenfruchtbeprobung verwendet worden waren, wurde mit Sicheln bodennah abgeschnitten. Die Erntefläche war 5 m lang und 1,5 m breit, sie umfasste demgemäß 7,5 m<sup>2</sup>.

---

Analog zur Vorgehensweise bei den Winterzwischenfrüchten wurde der Mais nach der Ernte gehäckselt (Häcksler der Firma Walter & Wintersteiger, Typ LH 120, Häcksellänge  $\leq 3$  cm) und für die TM-Bestimmung bei 105 °C getrocknet. Anschließend wurde die Trockenmasse je Hektar berechnet.

Die Abschätzung der Methanerträge aus dem Energiemais erfolgte durch Multiplikation der Spross-TM mit der Pauschalgröße von  $0,321 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  (Döhler et al. 2009).

## 2.11 Statistik

Die statistischen Berechnungen der Daten erfolgten mit dem Computerprogramm SPSS Statistics 17.0, Version 17.0.0 für Windows; Firma SPSS Inc., Chicago (USA). Das Programm ermöglichte die Prüfung auf Gleichheit der Varianzen mit der Durchführung des Levene-Tests. Des Weiteren konnte mit dem Shapiro-Wilk-Test die Normalverteilung der Residuen überprüft werden. Nach der Durchführung der Varianzanalysen (einfaktorielle ANOVA) konnten multiple Mittelwertvergleiche und Konfidenzintervalle mit dem Tukey-Test errechnet werden. In Einzelfällen verliefen die Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität der Versuchsdaten approximativ. Lineare Zusammenhänge zwischen Merkmalen wurden durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson überprüft. Bei den statistischen Berechnungen wurde das Design des Versuches als Blockanlage berücksichtigt.

## 2.12 Berechnung des Indexes der relativen Anbauwürdigkeit ( $I_{RA}$ ) der geprüften Varianten

Zur Verknüpfung von Ergebnissen bei der Absenkung der Nmin-Werte im Dezember sowie der Methanerträge der Winterzwischenfrüchte und der TM-Erträge des Energiemaises wurden Indizes der genannten Parameter für jede Variante errechnet. Die Indizes wurden so konstruiert, dass der günstige Fall, d.h. niedrige Nmin-Werte, hohe Methanerträge der Zwischenfrüchte und hohe Maiserträge, zu größeren Index-Werten führte. Zur Berechnung der Indizes wurden Datensätze der Varianten 1 bis 33 berücksichtigt. Die errechneten drei Indizes wurden anschließend zu einem Gesamtindex  $I_{RA}$  gebündelt. Es wurden die nachfolgend erläuterten Berechnungen durchgeführt:

### 2.12.1 Nmin-Index

Der Nmin-Index ( $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ ) beschreibt die Differenz des Nmin-Wertes der geprüften Variante im Dezember zum mittleren Nmin-Wert aller Varianten im Dezember. Folgende Formel wurde zur Berechnung des Indexes einer jeden Parzelle verwendet:

$$\text{Index}_{\text{Nmin}} = \frac{(\overline{N}_{\text{min Dez}} - N_{\text{min Dez}})}{\overline{N}_{\text{min Dez}}}$$

wobei

$\overline{N}_{\text{min Dez}}$  = arithmetischer Mittelwert der Nmin-Werte aller Varianten im Dezember  
[kg N ha<sup>-1</sup>]

$N_{\text{min Dez}}$  = Nmin-Wert der Variante im Dezember [kg N ha<sup>-1</sup>]

bedeuten.

Der  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  liegt zwischen dem Wert 0 und dem höchstmöglichen Wert 1, wenn der Nmin-Wert einer Variante kleiner ist als der Mittelwert aller Varianten. Ein höherer Nmin-Wert als der Mittelwert aller Varianten führt hingegen zu einem negativen  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ . Der Wertebereich des  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  erstreckt sich insgesamt von  $-\infty$  bis +1.

### 2.12.2 Winterzwischenfrucht-Index

Der Winterzwischenfrucht-Index ( $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ ) basiert auf dem Methan-Flächenertrag der Winterzwischenfrüchte im Monat Mai.

Es wurde folgende Formel zur Berechnung der Index-Werte verwendet:

$$\text{Index}_{\text{WZfr}} = \frac{Y_{\text{Methan}}}{\overline{Y}_{\text{Methan}}} - 1$$

wobei

$Y_{\text{Methan}}$  = Methanertrag der Variante im Mai [Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>]

$\overline{Y}_{\text{Methan}}$  = arithmetischer Mittelwert der Methanerträge aller Varianten im Mai  
[Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>]

bedeuten.

Der  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  einer Variante liegt zwischen -1 und 0, wenn der Methan-Flächenertrag einer Variante kleiner oder gleich dem Mittelwert der Methan-Flächenerträge aller Varianten ist. Liegt der Methan-Flächenertrag oberhalb des Mittelwertes aller Varianten wird er positiv; läge der Methan-Flächenertrag einer Variante z.B. dreimal so hoch wie der Mittelwert aller Varianten wäre der  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  gleich 2. Der Wertebereich des  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  erstreckt sich insgesamt von -1 bis  $+\infty$ .

### 2.12.3 Energiemais-Index

Basis zur Berechnung des Energiemais-Indexes ( $\text{Index}_{\text{Mais}}$ ) war der TM-Ertrag des Energiemaisses. Bei diesem Index wird der TM-Ertrag des Maises jeder Variante, ins Verhältnis zum mittleren Maisertrag aller geprüften Varianten gesetzt. Die Index-Werte der Varianten wurden nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Index}_{\text{Mais}} = \frac{Y_{\text{Mais}}}{\bar{Y}_{\text{Mais}}} - 1$$

wobei

$$Y_{\text{Mais}} = \text{Maisertrag einer Variante [dt TM ha}^{-1}\text{]}$$

$$\bar{Y}_{\text{Mais}} = \text{arithmetischer Mittelwert der Maiserträge aller Varianten [dt TM ha}^{-1}\text{]}$$

bedeuten.

Der  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  liegt zwischen -1 und 0, wenn der Maisertrag einer Variante kleiner oder gleich dem Mittelwert der Maiserträge aller Varianten ist. Liegt der Maisertrag oberhalb des Mittelwertes aller Varianten wird der  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  positiv. Der Wertebereich des  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  erstreckt sich insgesamt von -1 bis  $+\infty$ .

### 2.12.4 Gesamtindex $I_{\text{RA}}$

Der Gesamtindex  $I_{\text{RA}}$  ergibt sich durch die Addition der drei Teil-Indizes:

$$I_{\text{RA}} = \text{Index}_{\text{Nmin}} + \text{Index}_{\text{WZfr}} + \text{Index}_{\text{Mais}}$$

Da die drei Teil-Indizes einer Variante jeweils 0 sind wenn sie genau dem Mittelwert aller Varianten entsprechen, wäre somit der Gesamtindex  $I_{\text{RA}}$  dieser Variante ebenfalls gleich 0. Ein geringerer Nmin-Wert im Dezember bzw. ein höherer Methanertrag der Winterzwischenfrucht oder ein höherer Maisertrag führt zu einem höheren Gesamtindex  $I_{\text{RA}}$ .

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Sprosswachstum

#### 3.1.1 Sprossmasse

*Erstes Versuchsjahr*

Am ersten Beerntungstermin im Dezember 2006 wurde bereits beachtliche Sprossmasse geerntet (Tabelle 8). Insbesondere die Weidelgras-Varianten (Welsches Weidelgras 29,9 dt TM ha<sup>-1</sup>; Deutsches Weidelgras 26 dt TM ha<sup>-1</sup>; Bastard-Weidelgras 24,9 dt TM ha<sup>-1</sup>) und das Landsberger Gemenge (24,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) waren ertragreich. Der Markstammkohl (25,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) sowie der Inkarnatklée (21,2 dt TM ha<sup>-1</sup>) entwickelten sich ebenfalls zügig. Markstammkohl hatte einen signifikant höheren Ertrag als die Raps-Varianten „Talent“, „Oase“ und „Becker“. Die Getreide-Varianten sowie die Leguminosen Winterackerbohnen, Wintererbsen, Gelber Steinklee und Rotklee waren signifikant schwächer im Ertrag als die Weidelgras-Varianten. Zwischen den spät gesäten Varianten gab es keine signifikanten Abweichungen. Der Tabelle 8 ist ferner zu entnehmen, dass Gelber Steinklee mit 2,7 dt TM ha<sup>-1</sup> und die Wintererbsen (1,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) im Dezember 2006 die ertragsschwächsten Pflanzenarten waren.

Die nachfolgende Ernte der Pflanzenmasse im März 2007 zeigte, dass es bei nahezu allen Varianten einen Ertragszuwachs während der Wintermonate gegeben hat; allerdings erbrachten Wegwarte, Gelber Steinklee und das Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl weniger Biomasse als im Dezember 2006 (Tabelle 9). Der höchste Trockenmasse-Ertrag wurde beim Inkarnatklée mit 41,5 dt TM ha<sup>-1</sup> und Markstammkohl (36,2 dt TM ha<sup>-1</sup>) gemessen. Der Ertrag des Inkarnatklees war damit signifikant größer als die Erträge der übrigen Leguminosen. Die Sprossmassen der Weidelgras-Varianten lagen bei Deutschem Weidelgras (33,7 dt TM ha<sup>-1</sup>), Welschem Weidelgras (30,7 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Bastard-Weidelgras (30 dt TM ha<sup>-1</sup>) weiterhin im oberen Ertragsbereich. Die Getreide-Varianten konnten weitere Biomasse bilden und lagen nun mit 11,3 dt TM ha<sup>-1</sup> (Wintergerste, Sorte „Dorothea“) bis 26,1 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) auf einem mittleren Ertragsniveau. Den geringsten Ertrag erbrachten die Wintererbsen (5,9 dt TM ha<sup>-1</sup>), Wegwarte (3,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Gelber Steinklee (0,4 dt TM ha<sup>-1</sup>). Signifikante Sortenunterschiede konnten weder bei Raps noch bei Wintergerste oder Winterroggen nachgewiesen werden. Bei den Kreuzblütlern war Markstammkohl signifikant ertragsstärker als die Rapsorten (außer „Mikonos“), Rübsen und das Rübsen/Markstammkohl-Gemenge.

Tabelle 8: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Dezember 2006.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
02 Welsches Weidelgras	29,9	1,1	a
01 Deutsches Weidelgras	26,0	1,4	a b
19 Markstammkohl	25,3	1,7	a b
03 Bastard-Weidelgras	24,9	1,8	a b
33 Landsberger Gemenge	24,3	1,7	a b c
27 Inkarnatklée	21,2	1,0	a b c d
21 Spitzwegerich	20,7	2,2	a b c d
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	20,7	3,5	a b c d
28 GEM Wicken/Roggen	20,0	1,4	b c d
31 GEM Raps/Wegwarte	19,7	1,5	b c d
18 Winterrübsen	18,8	2,2	b c d
14 Winterraps "Mikonos"	17,5	3,5	b c d e
04 Knaulgras	16,6	3,5	b c d e f
16 Winterraps "Talent"	14,8	2,7	c d e f g
17 Winterraps „Becker“	14,8	1,9	c d e f g
24 Zottelwicken	14,0	2,6	d e f g h
15 Winterraps "Oase"	14,0	1,4	d e f g h
20 Wegwarte	8,4	1,7	e f g h i
11 Wintergerste "Reni"	7,8	1,7	e f g h i
09 Wintergerste "Ludmilla"	7,6	2,0	f g h i
05 Winterroggen "Vitallo"	7,1	1,1	f g h i
12 Wintergerste "Mombasa"	6,8	0,3	f g h i
26 Rotklée	6,5	1,0	g h i
07 Winterroggen "Carotrumpf"	6,1	1,5	g h i
08 Winterroggen "Resonanz"	5,7	0,6	g h i
10 Wintergerste "Dorothea"	5,7	0,7	g h i
13 Wintertriticale	4,8	1,2	h i
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	4,4	0,5	h i
22 Winterackerbohnen	4,4	0,5	h i
06 Winterroggen "Recrut"	3,8	0,2	i
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	3,4	0,8	i
25 Gelber Steinklée	2,7	0,5	i
23 Wintererbsen	1,3	0,2	i
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	9,7		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Bei der Beerntung im April 2007 (Tabelle 10) lag der Ertrag des Markstammkohls ( $67,9 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) vor dem Ertrag des Inkarnatklees ( $64,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und des Winterroggens (Sorte „Vitallo“;  $55,8 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Auch das Landsberger Gemenge ( $52,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Bastard-Weidelgras ( $52,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), das Gemenge aus Raps und Wegwarte ( $51,9 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) sowie das Gemenge aus Wicken und Roggen ( $50,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) waren ertragsstark. Nahezu alle Varianten konnten in dieser Wachstumsphase von der vorherigen Ernte am 5. März 2007 bis zum 16. April 2007 (41 Tage) über  $15 \text{ dt TM ha}^{-1}$  Biomasse produzieren. Die größte Ertragssteigerung mit einem Zuwachs an Biomasse von über  $31 \text{ dt TM ha}^{-1}$  wurde bei Markstammkohl gemessen, der Ertrag des Markstammkohls war dadurch im April 2007 signifikant höher als die Erträge der übrigen Brassica-Varianten; allerdings nicht signifikant höher als der Ertrag des Gemenges aus Winterraps und Wegwarte ( $51,9 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Die Gruppe der Leguminosen stellte auf der einen Seite mit Inkarnatklee eine der ertragsreichsten Varianten, auf der anderen Seite war der Gelbe Steinklee besonders ertragsschwach. Des Weiteren sind auch die Erträge der übrigen Leguminosen im unteren Drittel der Rangliste. Bei Winterraps und Wintergerste wurden keine signifikanten Sortenunterschiede festgestellt; bei Winterroggen hingegen war die Sorte „Vitallo“ signifikant ertragsstärker als die Sorte „Resonanz“ ( $33,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Die Varianten Wintererbsen ( $18,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Wegwarte ( $17,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und Gelber Steinklee ( $10,1 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) lieferten den geringsten Ertrag im April 2007.

Bei der letzten Beerntung des ersten Versuchsdurchgangs im Mai 2007 wurde der höchste Biomasseertrag bei Winterroggen (Sorte „Vitallo“,  $107,1 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) gemessen (Tabelle 11). Nahezu gleichstark war Inkarnatklee mit  $106,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ , Winterroggen (Sorte „Recrut“,  $105 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) sowie das Landsberger Gemenge mit  $101,3 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Außer den vier Winterroggen-Varianten konnte auch das Gemenge aus Wicken und Roggen über  $90 \text{ dt TM ha}^{-1}$  Biomasse aufbauen. Bei der Wintergerste konnte die Sorte „Ludmilla“ mit  $99,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$  den fünftstärksten Ertrag erbringen. Ähnlich gut schnitt Wintertriticale ( $91,8 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und auch das Gemenge aus Wintertriticale und Spitzwegerich ( $95,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) ab. Insgesamt waren die Getreide-Varianten unter den stärksten Versuchsgliedern recht häufig vertreten. Zwischen den vier Sorten des Winterroggens sowie des Winterrapses wurden keine signifikanten Unterschiede sichtbar; bei der Wintergerste war die Sorte „Dorothea“ signifikant schwächer als die übrigen drei Sorten. Die schwächsten Varianten im Mai 2007 waren das Gemenge aus Winterrüben und Markstammkohl ( $55,1 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Winterraps (Sorte „Mikonos“,  $51,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Winterrüben ( $49,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) sowie Gelber Steinklee ( $37,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ).

Tabelle 9: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin März 2007.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
27 Inkarnatklee	41,5	7,9	a
19 Markstammkohl	36,2	7,2	a b
01 Deutsches Weidelgras	33,7	1,7	a b c
33 Landsberger Gemenge	30,9	4,1	a b c d
02 Welsches Weidelgras	30,7	1,8	a b c d e
03 Bastard Weidelgras	30,0	1,5	a b c d e f
21 Spitzwegerich	28,2	2,7	a b c d e f g
05 Winterroggen "Vitallo"	26,1	1,7	a b c d e f g h
14 Winterraps "Mikonos"	25,7	3,1	b c d e f g h
31 GEM Raps/Wegwarte	23,8	1,8	b c d e f g h
24 Zottelwicken	22,2	3,6	b c d e f g h
28 GEM Wicken/Roggen	20,8	1,5	b c d e f g h i
04 Knaulgras	20,4	1,3	c d e f g h i
12 Wintergerste "Mombasa"	20,0	0,6	c d e f g h i
06 Winterroggen "Recrut"	19,2	3,1	c d e f g h i
16 Winterraps "Talent"	19,2	1,7	c d e f g h i
15 Winterraps "Oase"	18,9	0,4	c d e f g h i j
18 Winterrübsen	18,7	1,3	c d e f g h i j
17 Winterraps „Becker“	18,1	2,8	d e f g h i j
07 Winterroggen "Carotrumpf"	16,9	0,6	d e f g h i j
09 Wintergerste "Ludmilla"	16,9	2,6	d e f g h i j
08 Winterroggen "Resonanz"	16,8	2,1	d e f g h i j
11 Wintergerste "Reni"	16,3	1,2	d e f g h i j
13 Wintertriticale	15,3	4,6	d e f g h i j k
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	15,3	1,8	e f g h i j k
26 Rotklee	14,6	2,9	f g h i j k
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	14,4	2,1	g h i j k
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	14,3	2,5	g h i j k
22 Winterackerbohnen	13,2	1,0	g h i j k
10 Wintergerste "Dorothea"	11,3	1,5	h i j k
23 Wintererbsen	5,9	0,8	i j k
20 Wegwarte	3,6	0,6	j k
25 Gelber Steinklee	0,4	0,1	k
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	15,5		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Tabelle 10: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin April 2007.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha-1]	s $\bar{x}$	Homogene Gruppen
19 Markstammkohl	67,9	8,3	a
27 Inkarnatklee	64,7	2,6	a b
05 Winterroggen "Vitallo"	55,8	4,4	a b c
33 Landsberger Gemenge	52,5	3,6	a b c d
03 Bastard-Weidelgras	52,4	0,7	a b c d
31 GEM Raps/Wegwarte	51,9	5,5	a b c d
28 GEM Wicken/Roggen	50,4	1,9	a b c d e
01 Deutsches Weidelgras	48,3	3,2	a b c d e f
02 Welsches Weidelgras	47,0	2,9	a b c d e f
15 Winterraps "Oase"	43,8	4,3	b c d e f
14 Winterraps "Mikonos"	43,4	9,2	b c d e f
07 Winterroggen "Carotrumpf"	43,1	3,7	b c d e f
06 Winterroggen "Recrut"	41,8	4,0	c d e f
16 Winterraps "Talent"	40,9	3,3	c d e f
21 Spitzwegerich	40,3	3,2	c d e f g
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	40,0	6,2	c d e f g
09 Wintergerste "Ludmilla"	39,4	0,7	c d e f g
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	38,6	2,6	c d e f g h
12 Wintergerste "Mombasa"	38,4	2,9	c d e f g h
17 Winterraps „Becker“	37,3	1,3	c d e f g h
18 Winterrübsen	35,4	2,9	c d e f g h
04 Knautgras	35,3	2,7	c d e f g h
13 Wintertriticale	34,2	2,6	c d e f g h
11 Wintergerste "Reni"	33,9	1,6	d e f g h
08 Winterroggen "Resonanz"	33,7	5,2	d e f g h
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	32,6	4,1	d e f g h
26 Rotklee	31,0	4,3	d e f g h i
22 Winterackerbohnen	29,1	4,4	e f g h i
24 Zottelwicken	28,7	4,7	e f g h i
10 Wintergerste "Dorothea"	27,3	3,3	f g h i
23 Wintererbsen	18,7	1,7	g h i
20 Wegwarte	17,2	1,8	h i
25 Gelber Steinklee	10,1	1,2	i
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	21,9		

s $\bar{x}$  : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden,  $p < 0,05$  (Tukey-Test).

Tabelle 11: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Mai 2007.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
05 Winterroggen "Vitallo"	107,1	9,4	a
27 Inkarnatklée	106,5	4,8	a
06 Winterroggen "Recrut"	105,0	13,7	a b
33 Landsberger Gemenge	101,3	9,0	a b c
09 Wintergerste "Ludmilla"	99,6	7,6	a b c
07 Winterroggen "Carotrumpf"	98,9	4,8	a b c
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	95,7	11,4	a b c d
28 GEM Wicken/Roggen	95,2	5,7	a b c d
13 Wintertriticale	91,8	5,5	a b c d e
08 Winterroggen "Resonanz"	90,7	3,4	a b c d e
02 Welsches Weidelgras	90,6	1,8	a b c d e
03 Bastard-Weidelgras	90,1	1,4	a b c d e
22 Winterackerbohnen	89,4	7,9	a b c d e f
19 Markstammkohl	86,6	8,9	a b c d e f
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	82,5	3,6	a b c d e f g
11 Wintergerste "Reni"	80,8	4,9	a b c d e f g h
12 Wintergerste "Mombasa"	78,9	4,7	a b c d e f g h i
01 Deutsches Weidelgras	77,9	3,2	a b c d e f g h i
04 Knaulgras	74,3	3,1	b c d e f g h i
21 Spitzwegerich	73,0	2,7	c d e f g h i
15 Winterraps "Oase"	67,3	2,4	d e f g h i j
31 GEM Raps/Wegwarte	66,8	1,7	d e f g h i j
10 Wintergerste "Dorothea"	65,9	9,6	d e f g h i j
16 Winterraps "Talent"	65,1	2,0	d e f g h i j
26 Rotklée	63,6	4,4	e f g h i j
20 Wegwarte	58,3	6,4	f g h i j
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	55,1	3,4	g h i j
17 Winterraps „Becker“	54,9	4,0	g h i j
23 Wintererbsen	54,9	3,4	g h i j
14 Winterraps "Mikonos"	51,2	5,1	h i j
18 Winterrübsen	49,4	2,7	i j
24 Zottelwicken	49,2	7,0	i j
25 Gelber Steinklée	37,6	2,7	j
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	31,1		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

---

*Zweites Versuchsjahr*

Die erste Ernte des zweiten Versuchsdurchgangs im Dezember 2007 erbrachte zum Teil nur sehr geringe Erträge (Tabelle 12). Die spät gesäten Getreide-Varianten sowie die Winterackerbohnen und Wintererbsen konnten sich nur schwach entwickeln; andererseits waren die früh gesäten Varianten ähnlich ertragreich wie im Vorjahr. Ertragsstärkste Varianten im Dezember 2007 waren das Landsberger Gemenge ( $31,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Inkarnatklée ( $25,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) Welsches Weidelgras ( $25,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und Bastard-Weidelgras ( $23 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Die Weidelgras-Varianten und das Gemenge mit Weidelgras als Gemegepartner waren in der Lage in kurzer Zeit große Mengen an Biomasse zu bilden; hingegen war der Ertrag des Knaulgrases im Dezember 2007 signifikant geringer als die Erträge der Weidelgrasarten. Bei den Erträgen der Kreuzblütler gab es eine signifikante Ertragsdifferenz zwischen Winterrübsen und Markstammkohl; die Erträge der Rapsorten lagen zwischen den Erträgen von Rübsen und Markstammkohl, sie unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Markstammkohl ( $9,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und Wegwarte ( $7,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) waren die schwächsten Pflanzenarten unter den früh gesäten Varianten. Die Sprossmasse der spät gesäten Varianten lag nur zwischen  $0,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$  und  $0,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ .

Während der Wintermonate vom Dezember 2007 bis zum Beerntungstermin im März 2008 veränderte sich die Sprossmasse der Winterzwischenfrüchte nur leicht (Tabelle 13). Bei den Varianten Winterraps (Varietät „Becker“;  $-2,8 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und bei dem Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl ( $-2,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) sowie bei Wegwarte ( $-1,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Winterraps (Sorte „Oase“;  $-1 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Gelber Steinklee ( $-0,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und Winterrübsen ( $-0,5 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) wurde ein Verlust an oberirdischer Pflanzenmasse gemessen. Somit sind vier Varianten mit Kreuzblütlern von einem Abbau an Biomasse betroffen. Die meisten Varianten konnten jedoch weitere Pflanzenmasse aufbauen. Die höchsten Erträge erzielten Inkarnatklée mit  $43,0 \text{ dt TM ha}^{-1}$  und das Landsberger Gemenge ( $34,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Die Ertragsunterschiede dieser zwei Varianten waren statistisch nicht signifikant, jedoch gegenüber allen übrigen Varianten war der Ertrag des Inkarnatklees signifikant größer. Auch Zottelwicken und das Gemenge aus Wicken und Roggen erbrachten gute Erträge und lagen leicht über den Erträgen der Weidelgras-Varianten. Somit sind zu diesem Zeitpunkt Inkarnatklée, Zottelwicken und Weidelgras in Reinsaaten und in den Gemengen unter den ertragreicheren Varianten. Die Prüfglieder mit Kreuzblütlern lagen im Bereich zwischen  $20,3 \text{ dt TM ha}^{-1}$  und  $12,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Signifikanzen zwischen den Rapsorten wurden nicht gefunden. Geringe Erträge erbrachten wiederum die spät gesäten Varianten, insbesondere Wintererbsen ( $1,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Winterackerbohnen ( $1,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) und Gelber Steinklee ( $0,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ).

Tabelle 12: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Dezember 2007.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x</sub>	Homogene Gruppen
33 Landsberger Gemenge	31,6	2,8	a
27 Inkarnatklée	25,6	3,6	a b
02 Welsches Weidelgras	25,2	3,2	a b c
03 Bastard-Weidelgras	23,0	3,1	a b c d
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	21,7	3,3	a b c d e
28 GEM Wicken/Roggen	21,5	1,1	a b c d e
01 Deutsches Weidelgras	20,9	3,6	a b c d e
18 Winterrübsen	20,7	3,6	b c d e
21 Spitzwegerich	17,4	1,6	b c d e f
17 Winterraps „Becker“	16,4	2,6	b c d e f
16 Winterraps "Talent"	16,3	4,0	b c d e f
24 Zottelwicken	14,3	0,7	c d e f g
15 Winterraps "Oase"	14,3	2,4	d e f g
31 GEM Raps/Wegwarte	12,9	0,8	d e f g
14 Winterraps "Mikonos"	11,9	2,6	e f g h
26 Rotklée	11,2	1,6	e f g h i
19 Markstammkohl	9,4	2,7	f g h i j
20 Wegwarte	7,5	1,9	f g h i j
04 Knaulgras	4,6	0,6	g h i j
25 Gelber Steinklée	1,3	0,4	h i j
09 Wintergerste "Ludmilla"	0,7	0,1	i j
11 Wintergerste "Reni"	0,7	0,1	i j
05 Winterroggen "Vitallo"	0,6	0,2	i j
12 Wintergerste "Mombasa"	0,6	0,1	i j
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	0,5	0,1	i j
08 Winterroggen "Resonanz"	0,4	0,1	i j
22 Winterackerbohnen	0,4	0,1	i j
07 Winterroggen "Carotrumpf"	0,3	0,1	j
13 Wintertriticale	0,3	0,1	j
06 Winterroggen "Recrut"	0,3	0,1	j
10 Wintergerste "Dorothea"	0,3	0,0	j
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	0,3	0,0	j
23 Wintererbsen	0,2	0,0	j
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	10,8		

s<sub>x</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Tabelle 13: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin März 2008.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
27 Inkarnatklee	43,0	1,6	a
33 Landsberger Gemenge	34,6	2,3	a b
24 Zottelwicken	27,2	2,4	b c
28 GEM Wicken/Roggen	26,8	1,9	b c
03 Bastard-Weidelgras	26,0	2,5	b c
02 Welsches Weidelgras	25,7	1,1	b c
01 Deutsches Weidelgras	25,0	2,2	b c d
26 Rotklee	23,8	1,8	c d
21 Spitzwegerich	23,5	3,1	c d
18 Winterrübsen	20,3	0,9	c d e
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	19,2	3,9	c d e
16 Winterraps "Talent"	17,8	4,2	c d e f
19 Markstammkohl	15,3	3,1	d e f g
17 Winterraps „Becker“	13,7	2,3	e f g h
15 Winterraps "Oase"	13,3	2,6	e f g h i
31 GEM Raps/Wegwarte	13,2	1,3	e f g h i j
14 Winterraps "Mikonos"	12,2	2,3	e f g h i j k
04 Knaulgras	8,6	1,3	f g h i j k l
20 Wegwarte	6,1	1,6	g h i j k l
08 Winterroggen "Resonanz"	4,7	1,1	h i j k l
05 Winterroggen "Vitallo"	4,7	0,9	h i j k l
09 Wintergerste "Ludmilla"	4,7	0,4	h i j k l
11 Wintergerste "Reni"	3,7	0,2	i j k l
12 Wintergerste "Mombasa"	3,6	0,5	i j k l
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	3,5	0,7	j k l
07 Winterroggen "Carotrumpf"	3,0	0,4	k l
10 Wintergerste "Dorothea"	2,7	0,3	k l
06 Winterroggen "Recrut"	2,2	0,4	l
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	2,1	0,5	l
13 Wintertriticale	1,8	0,5	l
23 Wintererbsen	1,4	0,4	l
22 Winterackerbohnen	1,2	0,4	l
25 Gelber Steinklee	0,6	0,2	l
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	9,8		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Tabelle 14: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin April 2008.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
27 Inkarnatklee	62,9	3,2	a
26 Rotklee	47,2	4,9	b
33 Landsberger Gemenge	46,2	4,7	b
28 GEM Wicken/Roggen	43,1	0,9	b c
24 Zottelwicken	39,0	1,1	b c d
02 Welsches Weidelgras	37,0	2,8	b c d e
18 Winterrübsen	31,5	2,1	c d e f
03 Bastard-Weidelgras	30,4	1,4	c d e f
01 Deutsches Weidelgras	28,6	2,7	c d e f g
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	26,2	5,3	d e f g h
21 Spitzwegerich	25,7	3,8	d e f g h
31 GEM Raps/Wegwarte	23,3	1,7	e f g h i
19 Markstammkohl	23,1	4,2	e f g h i
16 Winterraps "Talent"	20,8	4,5	f g h i j
15 Winterraps "Oase"	19,5	3,8	f g h i j k
14 Winterraps "Mikonos"	19,4	2,3	f g h i j k
17 Winterraps „Becker“	19,1	3,2	f g h i j k l
20 Wegwarte	14,3	2,1	g h i j k l m
04 Knaulgras	13,5	3,0	h i j k l m
05 Winterroggen "Vitallo"	10,4	1,7	i j k l m
08 Winterroggen "Resonanz"	8,7	1,6	i j k l m
09 Wintergerste "Ludmilla"	8,4	1,4	j k l m
06 Winterroggen "Recrut"	7,5	2,0	j k l m
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	7,5	0,9	j k l m
11 Wintergerste "Reni"	6,9	1,2	j k l m
12 Wintergerste "Mombasa"	6,3	1,0	j k l m
23 Wintererbsen	5,5	1,7	k l m
07 Winterroggen "Carotrumpf"	5,5	1,9	k l m
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	5,0	1,1	k l m
10 Wintergerste "Dorothea"	4,5	0,9	l m
13 Wintertriticale	3,8	0,8	m
22 Winterackerbohnen	3,0	0,9	m
25 Gelber Steinklee	2,5	0,8	m
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	14,7		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Tabelle 15: TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte zum Erntetermin Mai 2008.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
27 Inkarnatklee	98,5	4,2	a
33 Landsberger Gemenge	90,9	5,8	a b
26 Rotklee	77,1	5,5	a b c
28 GEM Wicken/Roggen	76,5	8,0	a b c d
03 Bastard-Weidelgras	73,7	6,4	a b c d e
02 Welsches Weidelgras	72,5	8,0	a b c d e f
18 Winterrüben	70,8	12,5	a b c d e f g
30 GEM Rüben/Markstammkohl	56,4	10,6	b c d e f g h
16 Winterraps "Talent"	56,4	10,3	b c d e f g h
15 Winterraps "Oase"	53,7	7,6	c d e f g h
24 Zottelwicken	50,5	3,3	c d e f g h
19 Markstammkohl	50,2	7,7	c d e f g h
05 Winterroggen "Vitallo"	46,1	8,1	c d e f g h i
17 Winterraps „Becker“	43,8	5,7	c d e f g h i
21 Spitzwegerich	42,6	6,0	c d e f g h i
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	42,0	3,4	c d e f g h i
01 Deutsches Weidelgras	41,6	7,8	c d e f g h i
20 Wegwarte	40,3	8,1	d e f g h i
23 Wintererbsen	38,0	4,6	e f g h i
31 GEM Raps/Wegwarte	36,7	4,5	f g h i
08 Winterroggen "Resonanz"	35,1	6,4	g h i
09 Wintergerste "Ludmilla"	34,6	6,6	g h i
14 Winterraps "Mikonos"	34,1	3,9	h i
06 Winterroggen "Recrut"	32,7	5,3	h i
04 Knaulgras	32,5	3,9	h i
11 Wintergerste "Reni"	29,1	5,2	h i
07 Winterroggen "Carotrumpf"	28,9	8,8	h i
22 Winterackerbohnen	25,9	5,2	h i
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	25,6	3,6	h i
13 Wintertriticale	24,7	4,3	h i
12 Wintergerste "Mombasa"	24,1	4,6	h i
10 Wintergerste "Dorothea"	23,3	3,7	h i
25 Gelber Steinklee	13,2	2,5	i
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	36,2		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Am folgenden Erntetermin im April 2008 erwies sich erneut Inkarnatklee mit nun 62,9 dt TM ha<sup>-1</sup> als signifikant biomassereichste Winterzwischenfrucht (Tabelle 14). Deutlich schwächer war Rotklee mit 47,2 dt TM ha<sup>-1</sup>, Landsberger Gemenge (46,2 dt TM ha<sup>-1</sup>), das Gemenge aus Wicken und Roggen (43,2 dt TM ha<sup>-1</sup>) sowie Zottelwicken (39,0 dt TM ha<sup>-1</sup>). Ertragreich waren ebenfalls die Weidelgras-Varianten (28,6 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 37 dt TM ha<sup>-1</sup>), hingegen war Knaulgras signifikant schwächer als die Weidelgrasarten. Keine signifikanten Abstände gab es bei den Kreuzblütlern; die Biomasse lag hier bei 19,1 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterraps „Becker“) bis 31,5 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterrübsen). Auch beim Anbau von Kreuzblütlern im Gemenge wichen die Erträge nicht signifikant von den Reinsaaten ab. Ebenso konnten zwischen den Erträgen der Wintergetreide-Varianten und den Wintererbsen und Winterackerbohnen keine Signifikanzen nachgewiesen werden. Den geringsten Biomasseertrag hatten Wintertriticale (3,8 dt TM ha<sup>-1</sup>), Winterackerbohnen (3,0 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Gelber Steinklee (2,5 dt TM ha<sup>-1</sup>).

Die Menge an oberirdischer Pflanzenmasse war bei der letzten Beerntung der Winterzwischenfrüchte im Mai 2008 deutlich höher als bei der Ernte zuvor (Tabelle 15). Einige Varianten konnten über 40 dt TM ha<sup>-1</sup> Biomasse hinzugewinnen. Inkarnatklee war im Mai 2008 die ertragreichste Variante (98,5 dt TM ha<sup>-1</sup>), gefolgt von Landsberger Gemenge mit 90,9 dt TM ha<sup>-1</sup>, Rotklee (77,1 dt TM ha<sup>-1</sup>) und dem Gemenge aus Wicken und Roggen (76,5 dt TM ha<sup>-1</sup>).

Zwei der drei Weidelgrasarten waren unter den ertragreichen Varianten (Bastard-Weidelgras 73,7 dt TM ha<sup>-1</sup>; Welsches Weidelgras 72,5 dt TM ha<sup>-1</sup>) während das Deutsche Weidelgras mit 41,6 dt TM ha<sup>-1</sup> schwächer war, und Knaulgras als weiteres Futtergras sogar signifikant schwächer im Ertrag war als die Weidelgras-Varianten. Die Brassica-Varianten zeigten auch im Mai 2008 ein einheitliches Ertragsniveau, signifikant war nur die Differenz zwischen Winterrübsen und der Rapsorte „Mikonos“. Bei den Wintergetreide-Varianten waren die Gerstensorten und Wintertriticale etwa gleichstark im Ertrag, tendenziell waren diese etwas schwächer als die Winterroggen-Varianten. Hier war Winterroggen der Sorte „Vitallo“ mit 46,1 dt TM ha<sup>-1</sup> durch hohe Zuwachsraten im letzten Versuchsabschnitt nun im mittleren Ertragsbereich zu finden. Am geringsten war der Ertrag bei Wintergerste (Sorte „Mombasa“; 24,1 dt TM ha<sup>-1</sup> sowie Sorte „Dorothea“; 23,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Gelbem Steinklee (13,2 dt TM ha<sup>-1</sup>).

### 3.1.2 Wachstumsraten

#### *Erstes Versuchsjahr*

Hohe tägliche Zuwächse der Pflanzen gab es im letzten Versuchsabschnitt des ersten Versuchsjahres vom 16. April bis 21. Mai 2007 (Abbildung 5). So wurden Wachstumsraten von 18 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> bei Winterroggen (Sorte „Recrut“) und des Weiteren auch bei dem Gemenge Triticale/Spitzwegerich in dem genannten Zeitraum gemessen. Ebenfalls hohe

Wachstumsraten zeigten Wintergerste (Sorte „Ludmilla“;  $17,2 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), Winterackerbohnen ( $17,2 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) Wintertriticale ( $16,5 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) und Winterroggen (Sorte „Resonanz“,  $16,3 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Die Kreuzblütler hatten geringe Wachstumsraten; die geringsten Wachstumsraten wurde bei Winterrübsen ( $4 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) und Winterraps (Sorte „Mikonos“) mit  $2,2 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  gemessen.

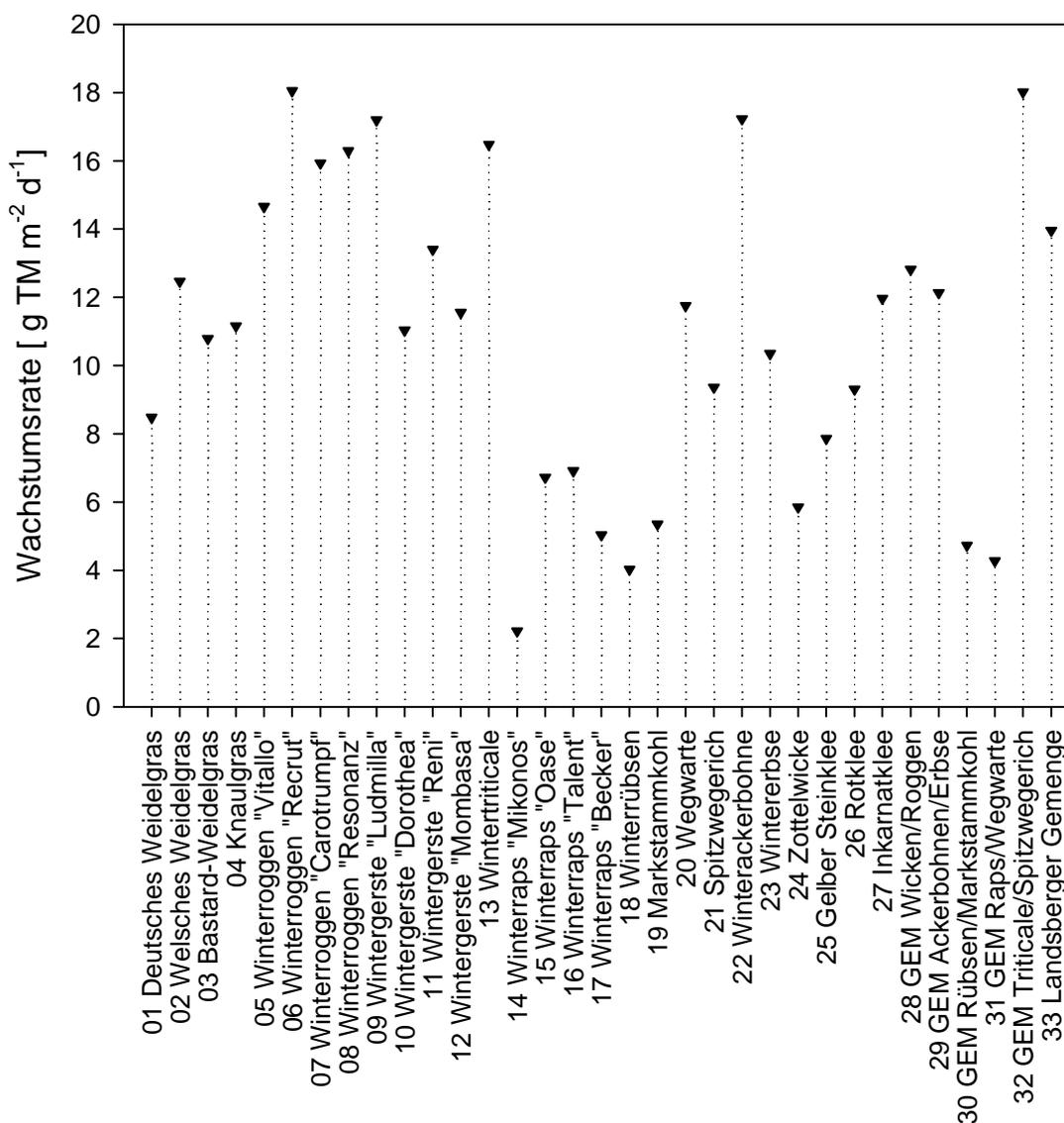


Abbildung 5: Wachstumsraten für den Zeitraum vom 16. April 2007 bis 21. Mai 2007.

### Zweites Versuchsjahr

Die höchsten Wachstumsraten im Zeitraum von 16. April bis zum 20. Mai 2008 (Abbildung 6) zeigten das Landsberger Gemenge ( $13,1 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), Bastard-Weidelgras ( $12,7 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) und Winterrübsen ( $11,6 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ). Wachstumsraten von über  $10 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  wurden auch bei Winterroggen (Sorte „Vitallo“,  $10,5 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), Winterraps

(Sorte „Talent“, 10,5 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), Welschem Weidelgras (10,4 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), dem Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen (10,1 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) und Winterraps (Sorte „Oase“, 10,1 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) gemessen. Die geringsten Zuwächse erzielten Deutsches Weidelgras (3,8 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), Zottelwicken (3,4 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) und Gelber Steinklee (3,1 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

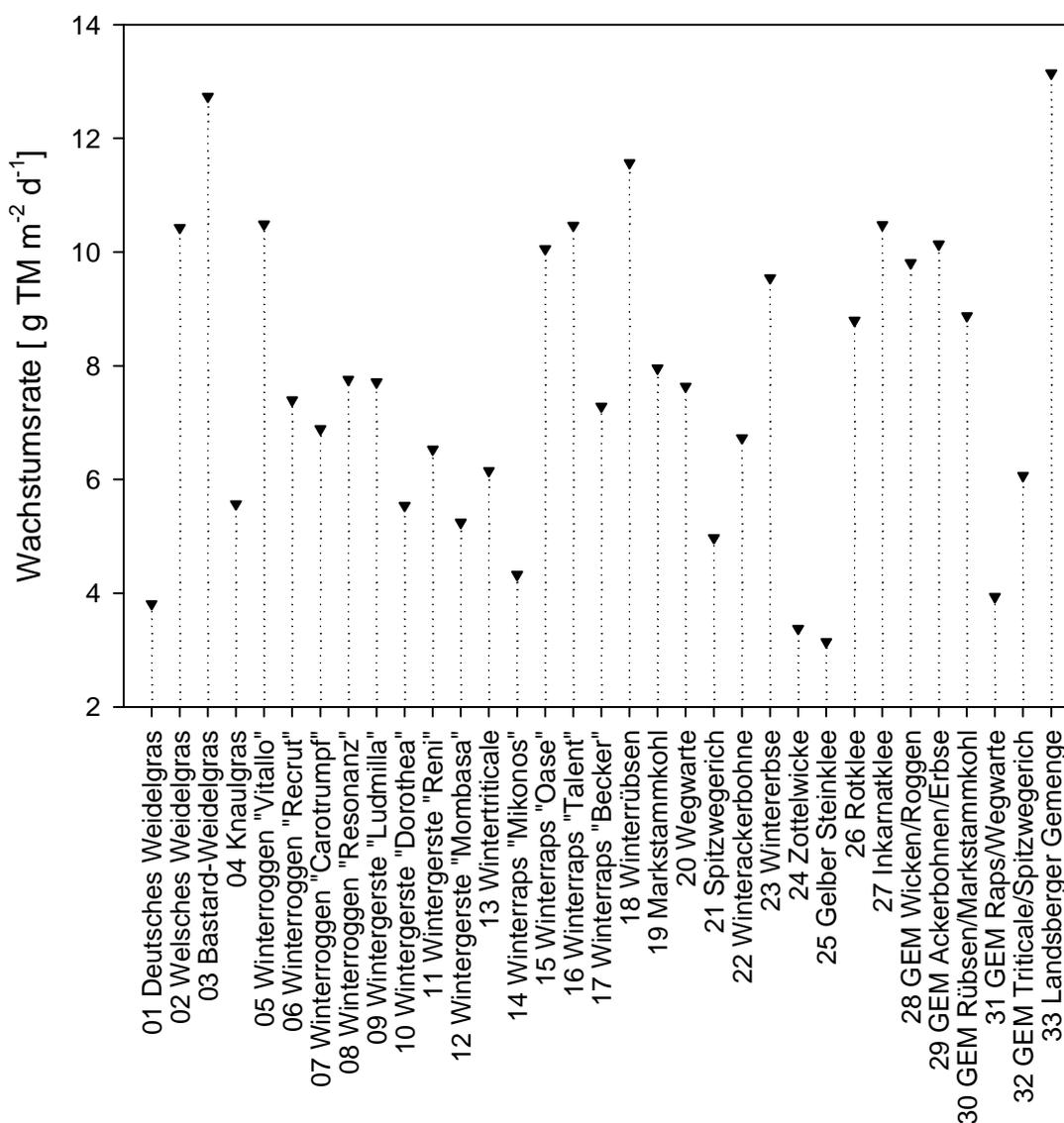


Abbildung 6: Wachstumsraten für den Zeitraum vom 16. April 2008 bis 20. Mai 2008.

### 3.1.3 Trockenmassegehalte

#### Erstes Versuchsjahr

Der Gehalt an Trockenmasse in der Frischmasse war im Dezember 2006 bei allen Varianten außer Knaulgras (22,5% TM) im Bereich zwischen 10% TM und 20% TM (Tabelle 16). Hohe Werte von 17,3% TM bis 19,3% TM zeigten die Weidelgras-Varianten, geringe Werte zeigten Wegwarte (10,7% TM) und Inkarnatklee (11,8% TM). Die Gehalte an Tro-

ckenmasse lagen im März 2007 bei allen Varianten außer bei Deutschem Weidelgras, Welschem Weidelgras und Rübsen in Reinsaat und Rübsen im Gemenge mit Markstammkohl, über den Werten, welche vor dem Winter gemessen wurden. Während die Werte für die Weidelgras-Varianten und die Kreuzblütler nur leichte Veränderungen zeigten, konnte bei den Getreide-Varianten ein Anstieg der Trockenmassegehalte auf 20%

Tabelle 16: Trockenmassegehalt in % der Frischmasse im oberirdischen Pflanzmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2006/2007.

Variante	Dez 06 [%]	Mrz 07 [%]	Apr 07 [%]	Mai 07 [%]
01 Deutsches Weidelgras	19,3	18,6	26,1	25,2
02 Welsches Weidelgras	17,3	17,0	19,7	25,5
03 Bastard-Weidelgras	17,4	18,5	20,5	25,5
04 Knaulgras	22,5	25,7	25,7	24,0
05 Winterroggen "Vitallo"	16,5	22,0	16,4	32,5
06 Winterroggen "Recrut"	15,8	24,9	16,2	26,6
07 Winterroggen "Carotrumpf"	15,2	20,5	17,2	29,0
08 Winterroggen "Resonanz"	17,0	22,5	18,4	28,5
09 Wintergerste "Ludmilla"	13,2	20,0	19,5	31,3
10 Wintergerste "Dorothea"	14,9	22,1	19,4	26,7
11 Wintergerste "Reni"	13,7	24,0	21,9	30,4
12 Wintergerste "Mombasa"	13,1	22,8	20,0	30,2
13 Wintertriticale	16,3	23,1	20,4	26,2
14 Winterraps "Mikonos"	15,2	17,5	17,5	22,4
15 Winterraps "Oase"	17,2	17,4	14,9	20,4
16 Winterraps "Talent"	16,1	16,4	14,7	20,0
17 Winterraps "DH285"	15,2	16,2	13,2	19,4
18 Winterrübsen	14,8	13,7	13,4	20,5
19 Markstammkohl	15,2	16,8	15,4	20,5
20 Wegwarte	10,7	10,7	11,0	8,9
21 Spitzwegerich	13,6	19,0	19,5	16,1
22 Winterackerbohnen	15,5	17,9	11,0	13,0
23 Wintererbsen	17,1	20,8	13,3	13,2
24 Zottelwicken	14,9	20,7	13,4	15,0
25 Gelber Steinklee	15,6	19,2	16,2	16,2
26 Rotklee	14,8	21,5	13,3	13,7
27 Inkarnatklee	11,8	17,8	11,2	14,1
28 GEM Wicken/Roggen	18,3	22,2	20,5	35,0
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	17,1	17,8	11,6	13,6
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	15,3	14,6	13,3	21,0
31 GEM Raps/Wegwarte	13,4	16,9	15,8	20,1
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	13,7	21,0	19,5	24,3
33 Landsberger Gemenge	16,6	18,1	20,9	26,1

Tabelle 17: Trockenmassegehalt in % der Frischmasse im oberirdischen Pflanzmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2007/2008.

Variante	Dez 07 [%]	Mrz 08 [%]	Apr 08 [%]	Mai 08 [%]
01 Deutsches Weidelgras	21,0	29,6	25,6	28,2
02 Welsches Weidelgras	16,9	25,4	20,2	24,3
03 Bastard-Weidelgras	17,4	27,6	21,9	25,6
04 Knaulgras	15,8	35,5	26,3	25,8
05 Winterroggen "Vitallo"	22,7	26,5	23,1	25,3
06 Winterroggen "Recrut"	22,2	27,4	22,7	22,9
07 Winterroggen "Carotrumpf"	23,7	30,3	21,4	22,8
08 Winterroggen "Resonanz"	22,4	29,0	23,3	24,4
09 Wintergerste "Ludmilla"	20,9	24,9	24,4	25,9
10 Wintergerste "Dorothea"	19,6	23,7	23,9	23,3
11 Wintergerste "Reni"	20,2	24,7	23,5	27,2
12 Wintergerste "Mombasa"	20,3	24,8	21,5	25,6
13 Wintertriticale	22,1	29,9	19,7	22,2
14 Winterraps "Mikonos"	17,9	19,6	16,6	28,1
15 Winterraps "Oase"	18,8	19,1	13,8	21,3
16 Winterraps "Talent"	17,9	17,3	13,9	20,4
17 Winterraps "DH285"	19,3	18,8	13,8	19,8
18 Winterrübsen	19,7	16,4	12,8	19,0
19 Markstammkohl	17,4	16,3	15,9	20,1
20 Wegwarte	15,9	19,7	15,5	9,9
21 Spitzwegerich	18,7	26,8	22,7	17,5
22 Winterackerbohnen	17,5	21,7	17,0	10,2
23 Wintererbsen	19,6	22,2	17,7	11,8
24 Zottelwicken	11,3	21,8	14,4	12,0
25 Gelber Steinklee	26,6	31,8	22,2	15,3
26 Rotklee	11,7	19,8	13,5	11,8
27 Inkarnatklee	10,9	17,5	11,9	10,9
28 GEM Wicken/Roggen	19,2	27,1	17,6	23,2
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	16,7	19,7	16,5	11,6
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	20,2	15,7	11,8	19,1
31 GEM Raps/Wegwarte	17,9	19,2	17,2	17,9
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	23,6	31,0	18,0	22,9
33 Landsberger Gemenge	14,4	21,9	17,5	20,8

bis 25% TM erfolgen. Weiterhin gering blieb der Trockenmassegehalt von Wegwarte (10,7% TM). Im April 2007 wurde bei nahezu allen Varianten geringere Trockenmassegehalte als im März 2007 ermittelt; die Gruppe der Futtergrasarten hingegen hatte höhere Trockenmassegehalte als im März 2007 und insgesamt die höchsten Trockenmassegehalte zu diesem Termin. Zum Mai 2007 stiegen die Trockenmassegehalte erneut an. Höchste Trockenmassegehalte zeigte zu diesem Zeitpunkt das Gemenge aus Wicken und Roggen (35% TM). Die Wintergetreide-Varianten konnten nun 26,2% TM (Wintertriticale) bis 32,5% TM (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) erreichen. Gering waren die Trockenmassegehalte bei den Leguminosen mit 13% TM (Winterackerbohnen) bis 16,2% TM (Gelber Steinklee) sowie bei Wegwarte (8,9% TM).

### *Zweites Versuchsjahr*

Bei der Beerntung der Sprossmasse im Dezember 2007 ergaben sich Trockenmassegehalte von 10,9% TM (Inkarnatklee) bis 26,6% TM (Gelber Steinklee, Tabelle 17). Recht homogen in einem Bereich von 19,6% TM bis 23,7% TM lagen die Getreide-Varianten; leicht darunter, in einem Bereich von 15,8% bis 21,0%, lagen die Futtergrasarten. Ebenfalls recht homogen waren die Trockenmassegehalte der Kreuzblütler zu diesem Termin (17,4% TM bis 19,7% TM). Bei der nachfolgenden Beerntung im März 2008 blieben die Werte der Kreuzblütler nahezu unverändert in einem Bereich von 16,3% TM bis 19,6% TM, die Werte der übrigen Varianten waren jedoch deutlich höher als im Dezember 2007. Die höchsten Trockenmassegehalte im März 2008 wurden bei Knaulgras (35,5% TM), dem Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich (31,0% TM) und bei Winterroggen (Sorte „Carotrumpf“; 30,3% TM) gemessen. Dieses Niveau konnte im April 2008 nicht erreicht werden; der Trockenmassegehalt bei der Wintergerstensorte „Dorothea“ blieb etwa gleich, alle anderen Varianten hatten geringere Trockenmassegehalte als im Monat zuvor. Die Werte der Futtergrasarten lagen nun mit 20,2% TM (Welsches Weidelgras) bis 26,3% TM (Knaulgras) auf einem ähnlichen Niveau wie die Wintergetreide-Varianten, die sich zwischen 19,7% TM (Triticale) und 24,4% TM (Wintergerste, Sorte „Ludmilla“) befanden. Geringe Werte zeigten Inkarnatklee (11,9% TM) und Rotklee (13,5% TM). Auch die Kreuzblütler lagen in einem Bereich von 12,8% TM (Winterrübsen) bis 16,6% TM (Winterraps, Sorte „Mikonos“). Der geringste Wert wurde bei dem Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl mit 11,8% TM gemessen. Im Mai 2008 erreichten die Futtergrasarten, die Wintergetreide-Varianten und die Kreuzblütler höhere Trockenmassegehalte im Spross als im April 2008, hingegen waren die Trockenmassegehalte aller Leguminosen geringer als im April 2008. Die Gehalte der Futtergrasarten lagen mit Werten von 24,3% TM bis 28,2% TM ähnlich hoch wie die Gehalte der Wintergetreide-Varianten (22,2% TM bis 27,2% TM). Unter den Kreuzblütlern konnte nur Winterraps (Sorte „Mikonos“) an das Niveau der Futtergrasarten und Getreide-Varianten heranreichen, die übrigen Kreuzblütler lagen bei 19,0% TM (Winterrübsen) bis 21,3% TM (Winterraps, Sorte „Oase“). Die geringsten Trockenmassegehalte erzielten Winterackerbohnen (10,2% TM), Inkarnatklee (10,9% TM), Rotklee (11,8% TM) und Wintererbsen (11,8% TM).

### 3.1.4 Stickstoff in der Sprossmasse

#### *Erstes Versuchsjahr*

Die in den oberirdischen Pflanzenteilen gespeicherte Stickstoffmenge war im Dezember 2006 bei einigen Varianten schon recht hoch (Tabelle 18). Insbesondere die Pflanzen-  
gruppe „Gräser“ ( $55 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und „Kreuzblütler“ ( $55 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) zeigten signifikant höhere N-Mengen im Spross als die Getreide- und Leguminosen-Varianten ( $27 \text{ kg N ha}^{-1}$  bzw.  $31 \text{ kg N ha}^{-1}$ ;  $p < 0,05$ ; Scheffé-Test). Die höchste akkumulierte Stickstoffmenge wurde bei Markstammkohl mit  $77,1 \text{ kg N ha}^{-1}$  gemessen. Auch die Gemenge-Varianten Raps/Wegwarte und Rübsen/Markstammkohl sowie das Landsberger Gemenge zeigten hohe N-Mengen im Spross. Die geringsten Stickstoffmengen wurden bei Gelbem Steinklee ( $9,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und bei Wintererbse ( $5,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) gemessen.

Im März 2007 war bei den Varianten Wegwarte, Gelber Steinklee und dem Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl weniger Stickstoff im Spross gespeichert als bei der Ernte im Dezember 2006. Der Gelbe Steinklee war die Winterzwischenfrucht, die im März 2007 mit Abstand am wenigsten Stickstoff ( $1,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) aufgenommen hatte. Im Mittel über alle Varianten stieg jedoch der N-Betrag von  $40,6 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Dezember 2006 auf  $58,3 \text{ kg N ha}^{-1}$  im März 2007. Überdurchschnittlich stiegen dabei alle Roggensorten, die Gersorten (außer „Dorothea“) und Wintertriticale. Des Weiteren stiegen die N-Mengen in den Leguminosen Winterackerbohnen, Zottelwicken, Rotklee und Inkarnatklee überdurchschnittlich stark. Der höchste Stickstoff-Betrag der Leguminosen wurde bei Inkarnatklee ( $110,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Zottelwicken ( $89,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) gemessen. Die höchste sprossgebundene Stickstoffmenge einer Nicht-Leguminose zeigte Markstammkohl mit  $90,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Bis zur nachfolgenden Probenahme im April 2007 waren außer bei Deutschem Weidelgras die N-Mengen aller Varianten angestiegen (Tabelle 18). Die Spannweite lag nun bei ca.  $160 \text{ kg N ha}^{-1}$  ( $39,4 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $199,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Besonders bei den Leguminosen stieg die Stickstoffmenge stark an; einige Varianten hatten etwa  $90 \text{ kg N ha}^{-1}$  mehr in der Sprossmasse gespeichert als bei der Untersuchung im März 2009. Die höchsten Werte wurden bei Inkarnatklee ( $199,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und dem Gemenge aus Ackerbohnen und Erbsen ( $147,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) gefunden. Bei den Nicht-Leguminosen waren die Varianten Markstammkohl ( $111,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Winterrogen (Sorte „Vitallo“;  $106,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) die stickstoffreichsten. Am geringsten war die Menge an Stickstoff im Spross bei Gelbem Steinklee ( $39,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), allerdings war auch hier eine Zunahme von ca.  $38 \text{ kg N ha}^{-1}$  seit der Beprobung im März festzustellen.

Die Stickstoffmengen der Pflanzengruppe „Leguminosen“ stiegen in der folgenden Periode nochmals deutlich an und waren im Mai 2007 im Mittel aller Leguminosen-Varianten mit  $196,5 \text{ kg N ha}^{-1}$  signifikant höher als die übrigen Pflanzengruppen ( $P < 0,05$ , Scheffé-Test). Sehr hoch war der Stickstoff-Wert bei Winterackerbohnen ( $301,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und auch bei dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen ( $256,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Die Stickstoffmenge in der Biomasse war bei den Leguminosen stets höher als bei den Nicht-

Tabelle 18: Stickstoffmenge im oberirdischen Pflanzenmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2006/2007.

Variante	Dez 06	Mrz 07	Apr 07	Mai 07
	[kg N ha <sup>-1</sup> ]			
01 Deutsches Weidelgras	57,8	74,3	71,2	80,6
02 Welsches Weidelgras	65,2	70,3	74,9	85,6
03 Bastard-Weidelgras	56,2	66,7	77,7	81,2
04 Knaulgras	40,9	54,3	69,8	80,6
05 Winterroggen "Vitallo"	30,5	82,1	97,3	89,6
06 Winterroggen "Recrut"	19,5	61,2	96,7	109,8
07 Winterroggen "Carotrumpf"	27,7	58,6	90,3	102,2
08 Winterroggen "Resonanz"	25,5	58,3	78,6	93,0
09 Wintergerste "Ludmilla"	33,7	56,8	74,1	95,6
10 Wintergerste "Dorothea"	24,0	36,0	61,1	69,7
11 Wintergerste "Reni"	32,5	50,8	65,4	79,5
12 Wintergerste "Mombasa"	31,5	61,4	75,0	82,0
13 Wintertriticale	19,7	47,8	71,4	95,1
14 Winterraps "Mikonos"	58,3	77,5	81,2	64,6
15 Winterraps "Oase"	46,6	63,2	82,1	74,6
16 Winterraps "Talent"	49,0	63,0	75,6	65,3
17 Winterraps „Becker“	50,3	61,9	72,9	59,6
18 Winterrübsen	51,2	57,7	69,6	56,1
19 Markstammkohl	77,1	90,3	111,3	92,7
20 Wegwarte	23,8	12,9	56,5	105,3
21 Spitzwegerich	51,6	60,8	84,0	98,9
22 Winterackerbohnen	18,0	41,4	102,5	301,4
23 Wintererbsen	5,9	24,6	77,3	149,7
24 Zottelwicken	61,7	89,6	137,8	199,6
25 Gelber Steinklee	9,6	1,7	39,4	114,2
26 Rotklee	22,5	45,7	110,2	171,4
27 Inkarnatklee	69,4	110,5	199,3	242,6
28 GEM Wicken/Roggen	59,1	60,6	85,5	94,2
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	19,2	54,1	147,2	256,6
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	58,9	45,3	76,7	67,2
31 GEM Raps/Wegwarte	72,3	71,6	92,8	80,6
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	16,4	44,9	69,7	104,0
33 Landsberger Gemenge	55,5	67,9	71,4	104,0
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	32,9	42,8	55,9	64,3

Leguminosen. Bei nahezu allen Varianten wurden im Mai 2007 höhere Stickstoffmengen als im April 2007 gemessen, einen besonders starken Anstieg unter den Nicht-Leguminosen von  $56,5 \text{ kg N ha}^{-1}$  auf  $105,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ , konnte bei Wegwarte gemessen werden. Anders als die übrigen Pflanzengruppen zeigten die Kreuzblütler im Mai weniger Stickstoff in der Sprossmasse als im April 2007. Auch die Gemenge aus Raps und Wegwarte sowie aus Rübsen und Markstammkohl zeigten geringere Werte als bei der vorherigen Untersuchung. Besonders stark fiel die sprossgebundene Stickstoffmenge bei Winter-raps der Sorte „Mikonos“ ( $- 20,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

#### *Zweites Versuchsjahr*

Im Dezember 2007 wurden die höchsten Stickstoffmengen im Spross bei Inkarnatklée ( $85,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), Landsberger Gemenge ( $82,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), Zottelwicken ( $63,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und dem Gemenge aus Wicken und Roggen ( $61,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) gemessen (Tabelle 19). Recht hoch war auch die Stickstoffmenge im Welschen Weidelgras ( $49,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Die beiden anderen Weidelgras-Varianten hatten ebenfalls hohe Werte, das Knaulgras als vierte Futtergrasart konnte deutlich weniger N im Spross einlagern. Bei den Kreuzblütlern und den Gemengen mit Kreuzblütlern waren die Stickstoffmengen im Spross recht homogen im Bereich von  $29,5 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei Markstammkohl bis  $41,8 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei Winter-rübsen. Alle Getreide-Varianten sowie die Winterackerbohnen und Wintererbsen konnten zu diesem Zeitpunkt weniger als  $4 \text{ kg N ha}^{-1}$  im Spross akkumulieren.

Die N-Mengen in der oberirdischen Biomasse veränderten sich bei den drei Weidelgras-Varianten zum nächsten Erntetermin im März 2008 nur wenig, sie lagen bei etwa  $40 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Tendenziell etwas höher als im Dezember 2007 waren die Stickstoffmengen im Spross der Kreuzblütler; im Mittel war der Wert hier um  $5 \text{ kg N ha}^{-1}$  angestiegen. Besonders stark gestiegen war der Wert bei Inkarnatklée ( $124,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Zottelwicken ( $122,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ); die Stickstoffmengen dieser Varianten waren signifikant höher als bei den übrigen Prüfgliedern im März 2008. Auch die Werte des Gemenges aus Zottelwicken und Winterroggen waren angestiegen, das Landsberger Gemenge hatte jedoch geringere Stickstoffmengen gespeichert. Die Stickstoffmengen im Spross der Wintergetreidearten sowie der Winterackerbohnen und Wintererbsen blieben weiterhin gering.

Im April 2008 waren die Werte vieler Varianten nur leicht höher als im März 2008, hingegen hatte das Deutsches Weidelgras leicht verloren. Einige Leguminosen zeigten jedoch deutlich höhere Stickstoffmengen im Spross als bei der vorherigen Untersuchung. Inkarnatklée hatte mit  $186,1 \text{ kg N ha}^{-1}$  den höchsten Wert, es folgten Rotklée ( $165,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), Zottelwicken ( $157 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und das Gemenge aus Wicken und Roggen ( $118,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

Tabelle 19: Stickstoffmenge im oberirdischen Pflanzmaterial an den vier Ernteterminen des Versuchsjahres 2007/2008.

Variante	Dez 07 [kg N ha <sup>-1</sup> ]	Mrz 08 [kg N ha <sup>-1</sup> ]	Apr 08 [kg N ha <sup>-1</sup> ]	Mai 08 [kg N ha <sup>-1</sup> ]
01 Deutsches Weidelgras	37,0	40,9	35,6	37,8
02 Welsches Weidelgras	49,3	39,7	45,3	49,6
03 Bastard-Weidelgras	39,9	37,4	40,4	57,9
04 Knaulgras	13,1	19,7	22,7	32,7
05 Winterroggen "Vitallo"	3,0	11,8	20,1	43,0
06 Winterroggen "Recrut"	1,4	7,3	16,1	38,5
07 Winterroggen "Carotrumpf"	1,5	7,6	12,3	34,0
08 Winterroggen "Resonanz"	1,9	12,1	17,6	37,8
09 Wintergerste "Ludmilla"	3,6	12,4	16,5	33,5
10 Wintergerste "Dorothea"	1,6	9,3	10,2	27,0
11 Wintergerste "Reni"	3,5	10,3	14,2	28,4
12 Wintergerste "Mombasa"	2,8	10,5	13,0	26,7
13 Wintertriticale	1,3	4,9	9,4	30,6
14 Winterraps "Mikonos"	37,6	36,5	45,2	53,8
15 Winterraps "Oase"	40,3	38,8	50,3	58,4
16 Winterraps "Talent"	38,9	49,7	43,7	62,9
17 Winterraps „Becker“	39,7	43,8	45,8	59,0
18 Winterrübsen	41,8	50,0	63,8	74,6
19 Markstammkohl	29,5	39,0	45,9	59,9
20 Wegwarte	14,1	17,5	42,3	61,3
21 Spitzwegerich	33,0	39,9	43,0	54,1
22 Winterackerbohnen	2,5	4,1	10,8	97,9
23 Wintererbsen	1,3	5,8	20,5	123,2
24 Zottelwicken	63,9	122,5	157,0	185,4
25 Gelber Steinklee	2,7	2,1	11,9	54,5
26 Rotklee	33,3	87,7	165,8	227,0
27 Inkarnatklee	85,7	124,9	186,1	236,1
28 GEM Wicken/Roggen	61,8	81,8	118,5	159,7
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	3,2	8,5	27,8	137,6
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	38,2	52,8	54,2	64,2
31 GEM Raps/Wegwarte	34,9	35,9	47,6	54,9
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	1,1	9,1	12,2	27,4
33 Landsberger Gemenge	82,2	71,8	78,2	95,6
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	32,2	29,0	46,5	58,3

Zur abschließenden Beprobung im Mai 2008 konnten die Leguminosen nochmals große Mengen an Stickstoff akkumulieren. Insbesondere die Wintererbsen und das Gemenge

aus Winterackerbohnen und Wintererbsen konnten in der letzten Phase mehr als 100 kg N ha<sup>-1</sup> zusätzlich in der Sprossmasse speichern. Die größte Menge an Stickstoff wurde bei Inkarnatklee (236,1 kg N ha<sup>-1</sup>) und Rotklee (227 kg N ha<sup>-1</sup>) gemessen. Die Nicht-Leguminosen konnten ausnahmslos zusätzliche Mengen an Stickstoff binden, die Zuwächse im Vergleich zur vorangegangenen Ernte betragen aber nur selten mehr als 20 kg N ha<sup>-1</sup>.

### 3.1.5 Spezifischer Methanertrag

Die Gärversuche mit der oberirdischen Biomasse vom Mai 2008 zeigten, dass die Wintergetreidearten die höchsten Erträge an Methan je kg TM lieferten (Tabelle 20). Besonders

Tabelle 20: Spezifischer Methanertrag der in Reinsaat angebauten Winterzwischenfrüchte im Mai 2008.

Variante	Spezifischer Methanertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg TM <sup>-1</sup> ]
01 Deutsches Weidelgras	0,295
02 Welsches Weidelgras	0,300
03 Bastard-Weidelgras	0,294
04 Knaulgras	0,290
05 Winterroggen "Vitallo"	0,307
06 Winterroggen "Recrut"	0,310
07 Winterroggen "Carotrumpf"	0,317
08 Winterroggen "Resonanz"	0,311
09 Wintergerste "Ludmilla"	0,309
10 Wintergerste "Dorothea"	0,310
11 Wintergerste "Reni"	0,309
12 Wintergerste "Mombasa"	0,311
13 Wintertriticale	0,309
14 Winterraps "Mikonos"	0,272
15 Winterraps "Oase"	0,273
16 Winterraps "Talent"	0,274
17 Winterraps "Becker"	0,271
18 Winterrübsen	0,277
19 Markstammkohl	0,278
20 Wegwarte	0,240
21 Spitzwegerich	0,233
22 Winterackerbohnen	0,263
23 Wintererbsen	0,266
24 Zottelwicken	0,256
25 Gelber Steinklee	0,252
26 Rotklee	0,238
27 Inkarnatklee	0,240

Winterroggen erbrachte mit Gaserträgen von 0,307 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> (Sorte „Vitallo“) bis 0,317 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> (Sorte „Carotrumpf“) die höchsten spezifischen Methanerträge. Wintertriticale (0,309 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) und Wintergerste (0,309 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> bis 0,311 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) erzielten nur wenig schwächere Methanerträge. Die Weidelgras-Varianten (0,294 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> bis 0,300 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) und Knaulgras (0,290 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) erbrachten weniger Methanertrag. Mit Ertragsdaten im Bereich von 0,271 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> bis 0,278 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> lagen die Kreuzblütler leicht über den Werten der Leguminosen und der Kräuter. Der geringste spezifische Methanertrag wurde bei der Vergärung von Spitzwegerich (0,233 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) sowie von Rotklee (0,238 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>), Inkarnatklee (0,240 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) und Wegwarte (0,240 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>) erzielt.

Die Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte ergeben sich aus den Trockenmasse-Erträgen (dt TM ha<sup>-1</sup>) und den spezifischen Methanerträgen (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup>). Die Methan-Flächenerträge sind aus Abbildung 23 und Abbildung 24 sowie in Tabelle A2 (Anhang) ersichtlich.

### 3.1.6 Ligningehalt

Im April 2008 wurde bei Spitzwegerich ein hoher Ligningehalt (8,5% in der TM) gemessen, Zottelwicken (8,0% in der TM) und Wegwarte (6,8% in der TM) lagen leicht darunter. Geringe Ligningehalte zeigten zu diesem Zeitpunkt die Gräser (Welsches Weidelgras 1,1% in der TM und Winterroggen 1,5% in der TM).

Im Mai 2008 war bei allen geprüften Varianten der Ligningehalt höher als im April 2008. Die höchsten Werte wurden bei Spitzwegerich (15,0 % in der TM), Zottelwicken (10,1% in der TM) und Wegwarte (7,1% in der TM) gemessen. Die Kreuzblütler Winterraps und Winterrübsen wiesen im Mai 2008 nahezu gleiche Werte (Winterraps 5,2% in der TM; Winterrübsen 5,1% in der TM) auf. Die geringsten Ligningehalte wurden bei Welschem Weidelgras (1,6% in der TM) und Winterroggen (3,2% in der TM) gemessen.

Tabelle 21: Ligningehalte ausgewählter Winterzwischenfrüchte im April 2008 und Mai 2008.

Variante	Ligningehalt im April 08 [% in der TM]	Ligningehalt im Mai 08 [% in der TM]
02 Welsches Weidelgras	1,1	1,6
05 Winterroggen "Vitallo"	1,5	3,2
14 Winterraps "Mikonos"	2,5	5,2
18 Winterrübsen	4,5	5,1
20 Wegwarte	6,8	7,1
21 Spitzwegerich	8,5	15,0
24 Zottelwicken	8,0	10,1
27 Inkarnatklee	3,5	5,1

## 3.2 Wurzelwachstum

### 3.2.1 Wurzelmasse

#### *Erstes Versuchsjahr*

Bei der ersten Probennahme der Wurzelmassen im Dezember 2006 erbrachte Wegwarte mit 24,6 dt TM ha<sup>-1</sup> die größte Wurzelmasse (Abbildung 7A). Geringere Wurzelmassen, jedoch nicht statistisch signifikant geringer, wurden bei Markstammkohl (16,8 dt TM ha<sup>-1</sup>), Winterrüben (15 dt TM ha<sup>-1</sup>), und Winterraps (Sorte „Mikonos“, 13,9 dt TM ha<sup>-1</sup>) gemessen; signifikant geringer als Wegwarte war die Wurzelmasse bei allen übrigen Prüfgliedern (Abbildung 7). Bei den drei Weidelgras-Varianten war die unterirdische Biomasse recht gleichmäßig mit 9,9 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 12,1 dt TM ha<sup>-1</sup>; etwas schwächer war Knautgras (6,4 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die Wurzelmasse der Kreuzblütler war weniger homogen; die Rapssorte „Talent“ (5,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) erbrachte etwa 8 dt TM ha<sup>-1</sup> weniger Wurzel-TM als die Sorte „Mikonos“ (13,9 dt TM ha<sup>-1</sup>), und etwa 11 dt TM ha<sup>-1</sup> weniger Wurzel-TM als Markstammkohl (16,8 dt TM ha<sup>-1</sup>); allerdings waren diese Differenzen nicht signifikant. Auch bei den Wurzelmassen der Leguminosen gab es keine signifikanten Differenzen; die biomasse-reichste Variante war hier Gelber Steinklee mit 6,9 dt TM ha<sup>-1</sup>. Des Weiteren gab es keine Signifikanzen bei den verschiedenen Gemengen, jedoch war das Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich (0,7 dt TM ha<sup>-1</sup>) über 11 dt TM ha<sup>-1</sup> schwächer als das Gemenge aus Rüben und Markstammkohl (11,8 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die geringste Wurzelmasse wurde bei den Getreide-Varianten mit 0,7 dt TM ha<sup>-1</sup> (Triticale) bis 1,9 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) gemessen.

Die Beprobung der Wurzeln im Mai erfolgte über zwei Tiefenstufen von je 30 cm. Im Folgenden wird zunächst die Gesamtwurzelmasse beider Schichten erläutert.

Im Mai 2007 präsentierte sich das Deutsche Weidelgras mit 66,3 dt TM ha<sup>-1</sup> als wurzelmassenreichste Winterzwischenfrucht in der Tiefenstufe von 0 bis 60 cm (Abbildung 7B). Ebenfalls reich an unterirdischer Biomasse waren Bastard-Weidelgras (53,7 dt TM ha<sup>-1</sup>), Markstammkohl (50,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) sowie Wegwarte (46,2 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die Getreide-Varianten verfügten über 13,7 dt TM ha<sup>-1</sup> (Wintergerste, Sorte „Dorothea“) bis 30,9 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen, Sorte „Recrut“); signifikante Differenzen zwischen den Sorten konnten hier nicht gefunden werden. Signifikant ungleich hingegen waren die Wurzel-TM einiger Brassica-Varianten; Markstammkohl hatte signifikant mehr Wurzel-TM als Winterrüben (14,4 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Winterraps (Sorte „Mikonos“, 10 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die Rapssorte „Mikonos“ zeigte mehr als 14 dt TM ha<sup>-1</sup> Differenz zu den anderen drei Raps-sorten, die Wurzelmassen von etwa 26 dt TM ha<sup>-1</sup> hatten; jedoch war dieser Unterschied nicht signifikant. Die Gruppe der Leguminosen stellte mit Gelbem Steinklee (8,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Wintererbsen (8,4 dt TM ha<sup>-1</sup>) die wurzelmasseärmsten Prüfglieder, Winter-ackerbohnen hingegen erbrachten 30,1 dt Wurzel-TM je ha.

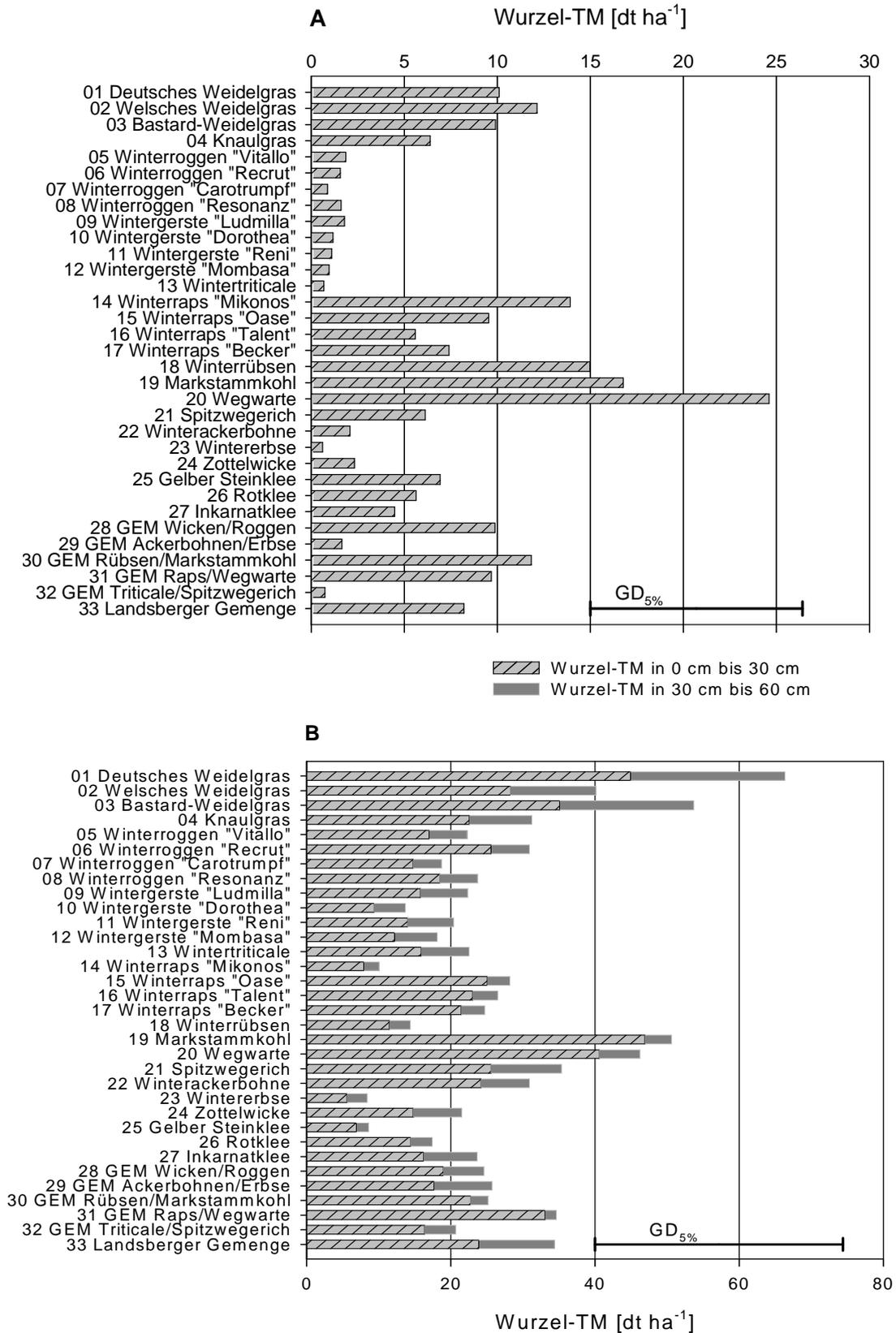


Abbildung 7A: Trockenmasse der Wurzeln im Dezember 2006. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 11,4 dt TM ha<sup>-1</sup> B: Trockenmasse der Wurzeln in zwei Tiefenstufen im Mai 2007. Die Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 26,9 dt TM ha<sup>-1</sup>.

Bei allen Varianten wurde die größte Wurzelmasse in der Bodenschicht bis 30 cm Tiefe gefunden. Die Biomasse in der Bodentiefe von 30 cm bis 60 cm war bei Deutschem Weidelgras mit 21,4 dt TM ha<sup>-1</sup> und bei Bastard-Weidelgras (18,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) besonders hoch. Etwas weniger Biomasse in dieser Tiefe zeigte Welsches Weidelgras (11,9 dt TM ha<sup>-1</sup>), Landsberger Gemenge (10,5 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Spitzwegerich (9,8 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die Getreide-Varianten und die Kreuzblütler hatten in dieser Tiefenschicht nur geringe Wurzelmassen im Bereich von 2,1 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 6,6 dt TM ha<sup>-1</sup>.

### *Zweites Versuchsjahr*

Zum Teil sehr geringe unterirdische Biomasse von weniger als 1 dt TM ha<sup>-1</sup> wurde im Dezember 2007 bei den Getreide-Varianten, Winterackerbohnen und Wintererbsen, auch deren Gemenge und bei dem Gemenge Triticale/Spitzwegerich gemessen (Abbildung 8A). Die höchste Biomasse besaß Wegwarte (14,9 dt TM ha<sup>-1</sup>), sie lag damit signifikant höher als die genannten schwachen Varianten und signifikant höher als Knaulgras (3,4 dt TM ha<sup>-1</sup>), Zottelwicken (2,7 dt TM ha<sup>-1</sup>), Gelber Steinklee (2,6 dt TM ha<sup>-1</sup>), und Markstammkohl (2 dt TM ha<sup>-1</sup>). Deutlich stärker als in Reinsaat hingegen war Markstammkohl im Gemenge mit Winterrübsen; es war die Variante mit der zweithöchsten Wurzeltrockenmasse (13,9 dt TM ha<sup>-1</sup>). Etwa gleich groß war die Wurzelmasse bei Landsberger Gemenge und den Weidelgras-Varianten; Knaulgras besaß weniger Wurzelmasse. Die Rapsorten und Winterrübsen besaßen ebenfalls etwa gleich viel Wurzelmasse (7,5 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 11,7 dt TM ha<sup>-1</sup>).

Die letztmalige Beprobung der Wurzeln des zweiten Versuchsjahres fand im Mai 2008 statt und wurde wiederum über zwei Tiefenschichten von je 30 cm Stärke durchgeführt. Die höchsten Wurzelmassen in 0 bis 60 cm Tiefe wurden bei den Weidelgras-Varianten und dem Landsberger Gemenge mit Weidelgras als Gemengebestandteil gemessen (Abbildung 8B). Deutsches Weidelgras (45,8 dt TM ha<sup>-1</sup>) lag vor Bastard-Weidelgras (37,8 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Welschem Weidelgras (34,8 dt TM ha<sup>-1</sup>). Landsberger Gemenge lag mit 35,7 dt TM ha<sup>-1</sup> ebenfalls auf diesem Niveau. Das Gemenge Rübsen und Markstammkohl besaß wenig mehr Wurzelmasse als Rübsen und Markstammkohl in Reinsaat, diese lagen gleichauf mit Spitzwegerich, Wegwarte und den Raps-Varianten „Talent“ und „Becker“. Tendenziell etwas geringere Wurzelmassen hatten die Rapsorten „Oase“ und „Mikonos“. Die Getreide-Varianten hatten im Mai 2008 mit 6,7 dt TM ha<sup>-1</sup> (Wintergerste, Sorte „Reni“) bis 12 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen, Sorte „Recrut“) relativ wenig Wurzelmasse gebildet. Zwischen den Getreide- und Rapsorten und auch zwischen den Getreidearten wurden keine signifikanten Differenzen der Wurzelmassen gefunden. Des Weiteren waren auch zwischen den Leguminosen keine Signifikanzen aufgetreten, allerdings war die Wurzelmasse unter Rotklee, Inkarnatklee und Zottelwicken leicht höher als bei Wintererbsen, Winterackerbohnen und Gelbem Steinklee.

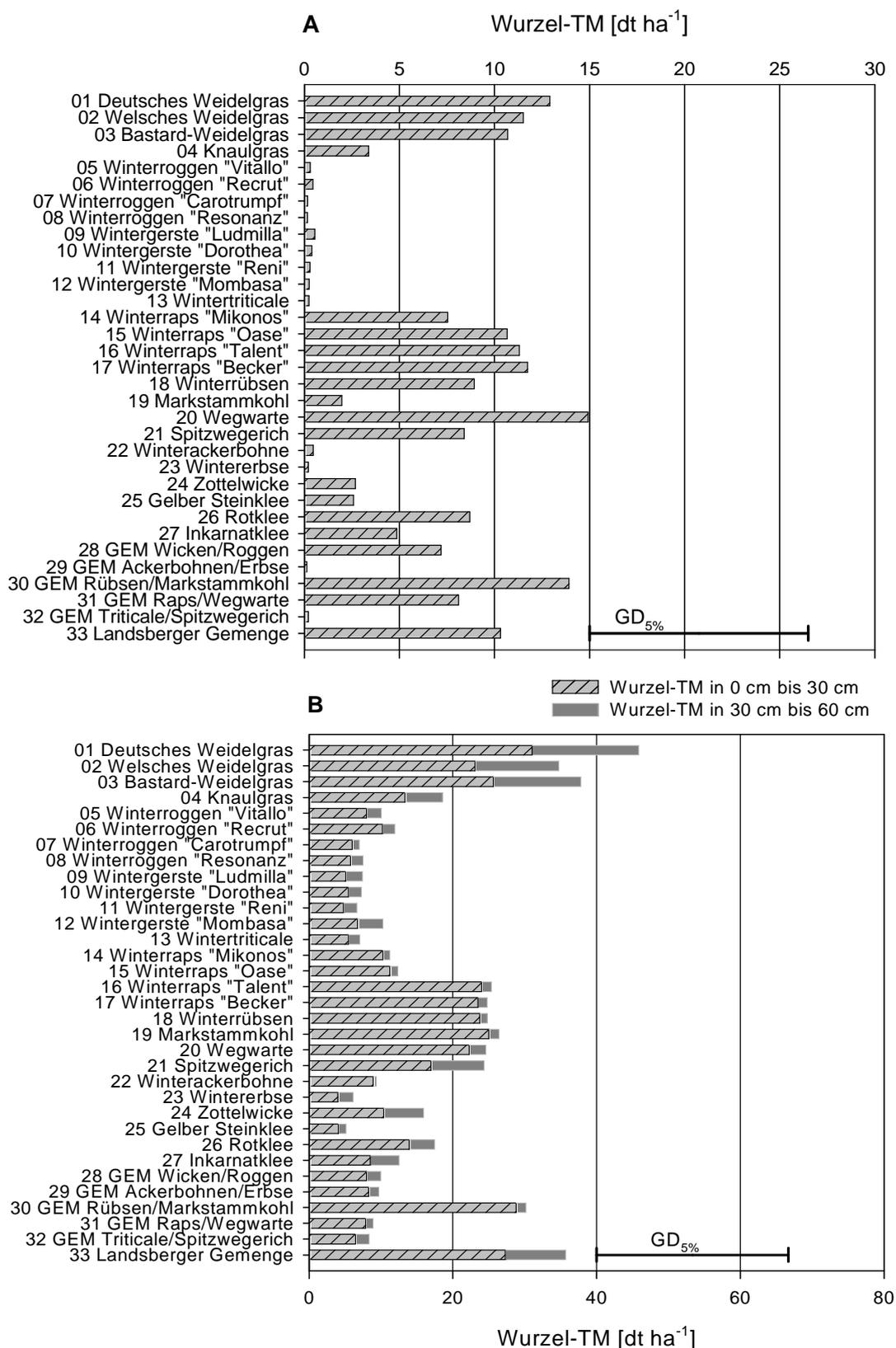


Abbildung 8A: Trockenmasse der Wurzeln im Dezember 2007. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 11,5 dt TM ha<sup>-1</sup> B: Trockenmasse der Wurzeln in zwei Tiefenstufen im Mai 2008. Die Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 26,7 dt TM ha<sup>-1</sup>

In der Tiefenstufe 0 cm bis 30 cm offenbarte das Deutsche Weidelgras (31,0 dt TM ha<sup>-1</sup>) die größte Wurzelmasse. Landsberger Gemenge (27,3 dt TM ha<sup>-1</sup>), Bastard-Weidelgras (25,7 dt TM ha<sup>-1</sup>) sowie das Welsche Weidelgras (23,1 dt TM ha<sup>-1</sup>) lagen ebenfalls in diesem Bereich. Hohe Wurzelmassen produzierte auch das Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl (28,8 dt TM ha<sup>-1</sup>) sowie Markstammkohl (25,0 dt TM ha<sup>-1</sup>), Winterraps (Sorte „Talent“, 24,0 dt TM ha<sup>-1</sup>), Winterrübsen (23,8 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Winterraps (Variante „Becker“, 23,5 dt TM ha<sup>-1</sup>). Die beiden Rapsvarianten „Oase“ (11,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) und „Mikonos“ (10,3 dt TM ha<sup>-1</sup>) zeigten deutlich weniger Wurzeltrockenmasse. Ebenfalls gering war die Wurzel-TM der Getreide-Varianten mit 4,8 dt TM ha<sup>-1</sup> (Wintergerste, Sorte „Reni“) bis 10,2 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen, Sorte „Recrut“).

In der Tiefenschicht 30 cm bis 60 cm waren die gemessenen Wurzelmassen in vielen Fällen recht einheitlich. Sie lagen in einem Bereich von 1 dt TM ha bis 5,5 dt TM ha<sup>-1</sup>. Jedoch wurden beim Deutschen Weidelgras (14,8 dt TM ha<sup>-1</sup>), Bastard-Weidelgras (12,1 dt TM ha<sup>-1</sup>), Welschen Weidelgras (11,7 dt TM ha<sup>-1</sup>) und Landsberger Gemenge (8,4 dt TM ha<sup>-1</sup>) in dieser Schicht höhere Werte gemessen. Dabei waren die Werte der Weidelgras-Varianten signifikant höher als die der übrigen Prüfglieder mit Ausnahme des Landsberger Gemenges und des Spitzwegerichs.

### 3.2.2 C/N-Verhältnis der Wurzeln

#### *Erstes Versuchsjahr*

Das C/N-Verhältnis der Wurzeln im Dezember 2006 betrug bei den Weidelgras-Varianten 50 bis 53 und bei Knaulgras 44 (Tabelle 22). Damit wurden bei den Futtergras-Varianten die höchsten Werte gemessen. Nur wenig enger war das C/N-Verhältnis vom Gemenge Wicken/Roggen (42) und Landsberger Gemenge (41); deutlich enger jedoch als bei den Weidelgras-Varianten war das C/N-Verhältnis der Roggenvarianten, diese lagen in einem Bereich von 32 bis 35. Auch die beiden Kräuterarten Wegwarte (30) und Spitzwegerich (31) hatten C/N-Werte auf diesem Niveau. Geringer als bei Winterroggen waren die C/N-Werte für die Wintergerste, sie lagen zwischen 26 und 29. Wiederum leicht geringer lagen die Werte der Kreuzblütler; die Rapsorten zeigten hier große Differenzen zwischen der Sorte „Mikonos“ (35) und den Varianten „Oase“ (22) und „Becker“ (23). Markstammkohl (33) hatte ein etwas weiteres C/N-Verhältnis als Rübsen und die Rapsorten (außer Sorte „Mikonos“). Bedeutend geringer als die C/N-Werte von Winterroggen waren die Werte aller Leguminosen. Das C/N-Verhältnis der Wurzeln von Gelbem Steinklee (15) war das engste, es folgten Wintererbsen (17), das Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (18), Zottelwicken (18), Winterackerbohnen (18), Inkarnatklee (18) und Rotklee (19).

Im Mai 2007 waren die C/N-Werte bei fast allen Varianten höher als im Dezember 2006. Die Kräuter-Variante Wegwarte und der Markstammkohl zeigten das weiteste C/N-Verhältnis (beide 67), sie lagen damit vor dem Gemenge aus Raps und Wegwarte (62). Das Deutsche Weidelgras (61) lag 9 Punkte über den Werten von Welschem Weidelgras

(52), Bastard-Weidelgras (53) und Knaulgras (52). Noch etwas höher waren die Werte der Winterroggensorten; sie lagen zwischen 53 (Sorte „Vitallo“) und 58 (Sorte „Resonanz“). Auf einem geringeren Niveau lagen die Wintergersten-Varianten; die Werte waren hier recht einheitlich bei 40 bis 43. Die Gruppe der Brassica-Varianten war weniger homogen, das C/N-Verhältnis von Markstammkohl und Winterraps (Sorte „Oase“, 64) war deutlich weiter als das C/N-Verhältnis von Winterrüben (38) und Winterraps (Sorte „Mikonos“, 44). Das engste C/N-Verhältnis wurde bei den Leguminosen gefunden. Die Werte der Leguminosen waren etwas geringer als die Werte der Gerstensorten und signifikant geringer als alle übrigen Prüfglieder. Das engste C/N-Verhältnis wurde bei Wintererbsen mit 16 gemessen, gefolgt von Zottelwicken (18), Rotklee (19) sowie Inkarnatklee und Winterackerbohnen (beide 21). Auch das Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen (21) und Gelber Steinklee (22) zeigten geringe Werte.

#### *Zweites Versuchsjahr*

Bei der ersten Analyse des C/N-Verhältnisses der Wurzeln im Dezember 2007 zeigten die Weidelgras-Varianten die höchsten Werte. Mit einem C/N-Verhältnis von 55 lag Bastard-Weidelgras an der Spitze. Nur wenig geringer war Deutsches Weidelgras (54) und Welsches Weidelgras (49). Signifikant enger als bei Bastard-Weidelgras und Deutschem Weidelgras war das C/N-Verhältnis des Landsberger Gemenges und Knaulgrases (beide 38). Bei den Getreide-Varianten zeigten die Roggensorten (30 bis 33) leicht höhere C/N-Werte als Wintergerste (25 bis 32) und Wintertriticale (27). Ebenfalls etwa auf dem Niveau der Wintergerste lagen die Werte der Kreuzblütler (21 bis 31) sowie Wegwarte (26) und Spitzwegerich (30). Die Leguminosen hatten die engsten C/N-Verhältnisse; die Werte betragen bei Zottelwicken und bei Rotklee 15. Wenige Punkte darüber lag Inkarnatklee (17), Winterackerbohnen (18) und Gelber Steinklee (20).

Im Mai 2008 zeigten alle Varianten außer Leguminosen erneut höhere Werte als im Dezember. Sehr weite C/N-Verhältnisse zeigten Markstammkohl (79) und Wegwarte (78). Auch die Roggen-Varianten hatten hohe C/N-Werte, sie lagen zwischen 68 (Sorte „Vitallo“) und 60 (Sorte „Recrut“). Wintertriticale (62) lag noch leicht vor den Futtergras-Varianten, welche C/N-Verhältnisse von 60 (Deutsches Weidelgras) bis 52 (Welsches Weidelgras) zeigten. Wenig gleichmäßig waren die Werte der Kreuzblütler, es gab deutliche Differenzen zwischen den Werten des Markstammkohls und den Rapsorten „Oase“ (47) und „Mikonos“ (36). Enge C/N-Verhältnisse wurden bei den Leguminosen gefunden; mit einem Wert von 17 wurde bei Wintererbsen das engste C/N-Verhältnis ermittelt. Nahezu gleich waren die Werte für Ackerbohnen (18), Zottelwicken (18), Rotklee (19), dem Gemenge Ackerbohnen/Erbsen (19), Inkarnatklee (21) und Gelbem Steinklee (27). Auch bei den Gemenge-Varianten zeigten die Gemenge mit einer Leguminose als Gemengepartner (Gemenge Wicken/Roggen, 29 und Landsberger Gemenge, 40) leicht engere C/N-Werte als die Gemenge aus Nicht-Leguminosen.

Tabelle 22: C/N-Verhältnis der Wurzeln an vier Beprobungsterminen.

Variante	Dez 06	Mai 07	Dez 07	Mai 08
01 Deutsches Weidelgras	51	61	54	60
02 Welsches Weidelgras	53	52	49	52
03 Bastard-Weidelgras	50	53	55	57
04 Knaulgras	44	52	38	54
05 Winterroggen "Vitallo"	33	53	33	68
06 Winterroggen "Recrut"	35	57	31	60
07 Winterroggen "Carotrumpf"	32	57	32	60
08 Winterroggen "Resonanz"	35	58	30	65
09 Wintergerste "Ludmilla"	29	42	32	56
10 Wintergerste "Dorothea"	26	43	25	52
11 Wintergerste "Reni"	26	40	27	53
12 Wintergerste "Mombasa"	28	40	27	51
13 Wintertriticale	35	52	27	62
14 Winterraps "Mikonos"	35	44	31	36
15 Winterraps "Oase"	22	64	23	47
16 Winterraps "Talent"	27	52	29	57
17 Winterraps "Becker"	23	54	21	54
18 Winterrübsen	24	38	21	54
19 Markstammkohl	33	67	29	79
20 Wegwarte	30	67	26	78
21 Spitzwegerich	31	46	30	48
22 Winterackerbohnen	18	21	18	18
23 Wintererbsen	17	16	21	17
24 Zottelwicken	18	18	15	18
25 Gelber Steinklee	15	22	20	27
26 Rotklee	19	19	15	19
27 Inkarnatklee	18	21	17	21
28 GEM Wicken/Roggen	42	45	29	29
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	18	21	24	19
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	25	45	22	46
31 GEM Raps/Wegwarte	30	62	30	46
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	38	54	31	64
33 Landsberger Gemenge	41	45	38	40

### 3.2.3 Wurzellängendichte

Erstes Versuchsjahr

Die Wurzellängendichte des oberen Bodens (0 – 30 cm) war im Dezember 2006 am größten bei Welschem Weidelgras (Abbildung 9). Hier wurde eine Wurzellängendichte (WLD) von  $6,5 \text{ cm cm}^{-3}$  erreicht. Die Werte von Bastard-Weidelgras ( $5,1 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Deutschem Weidelgras ( $4,1 \text{ cm cm}^{-3}$ ) lagen etwas unterhalb des Welschen Weidelgrases. Auch das Gemenge aus Wicken und Roggen ( $4,7 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und das Landsberger Gemenge ( $4,4 \text{ cm cm}^{-3}$ ) konnten hohe WLD erreichen. Signifikant unter Welschem Weidel-

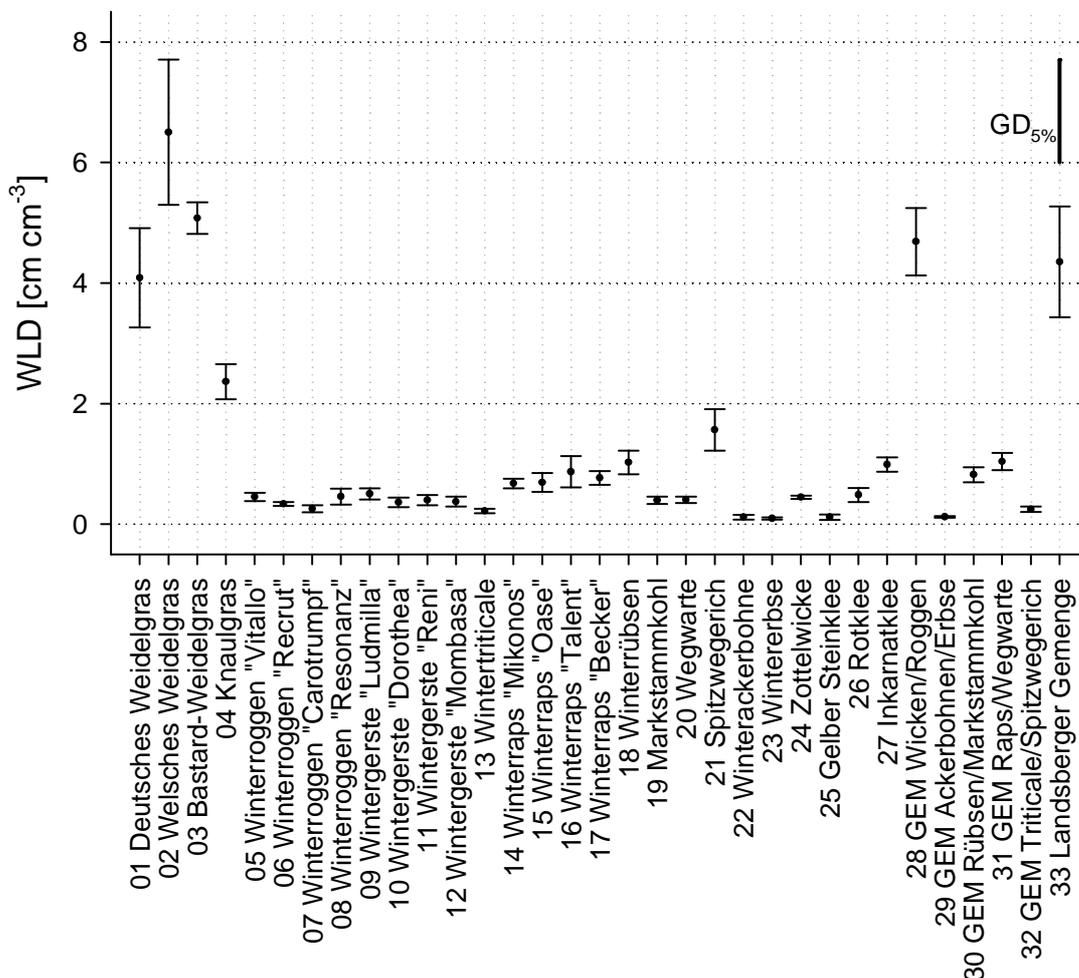


Abbildung 9: Wurzellängendichte im Dezember 2006 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $1,7 \text{ cm cm}^{-3}$ .

gras, Bastard-Weidelgras und dem Gemenge aus Wicken und Roggen, jedoch noch über der mittleren WLD ( $\bar{x} = 1,25$ ;  $n = 132$ ) lagen Knaulgras ( $2,4 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Spitzwegerich ( $1,6 \text{ cm cm}^{-3}$ ). Die Getreide-Varianten, die Brassica-Varianten sowie die Leguminosen

hatten Wurzellängendichten unter  $1 \text{ cm cm}^{-3}$ . Zwischen den Sorten konnten weder bei Winterroggen und Wintergerste noch bei Winterraps eine signifikante Differenz festgestellt werden.

Im Mai 2007 waren die WLD aller Varianten deutlich größer als sie bei der Analyse im Dezember waren (Abbildung 10). In der Bodentiefe bis 30 cm war die WLD bei Deutschem Weidelgras mit  $21,4 \text{ cm cm}^{-3}$  am höchsten. Ebenfalls sehr hoch waren die WLD bei den übrigen Futtergrasarten; bei Bastard-Weidelgras betrug sie  $16,9 \text{ cm cm}^{-3}$ , bei Knaulgras  $15,9 \text{ cm cm}^{-3}$  und bei Welschem Weidelgras  $14,2 \text{ cm cm}^{-3}$ . Bei Landsberger Gemeinde wurden ebenfalls  $15,9 \text{ cm cm}^{-3}$  gemessen. Die Differenz zwischen Deutschem Weidelgras und Welschem Weidelgras war hier statistisch signifikant. Nur wenig geringere WLD als die Futtergrasarten bzw. das Landsberger Gemeinde wurden bei Spitzwegerich ( $9,8 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und dem Gemeinde aus Wicken und Roggen ( $8,4 \text{ cm cm}^{-3}$ ) gemessen.

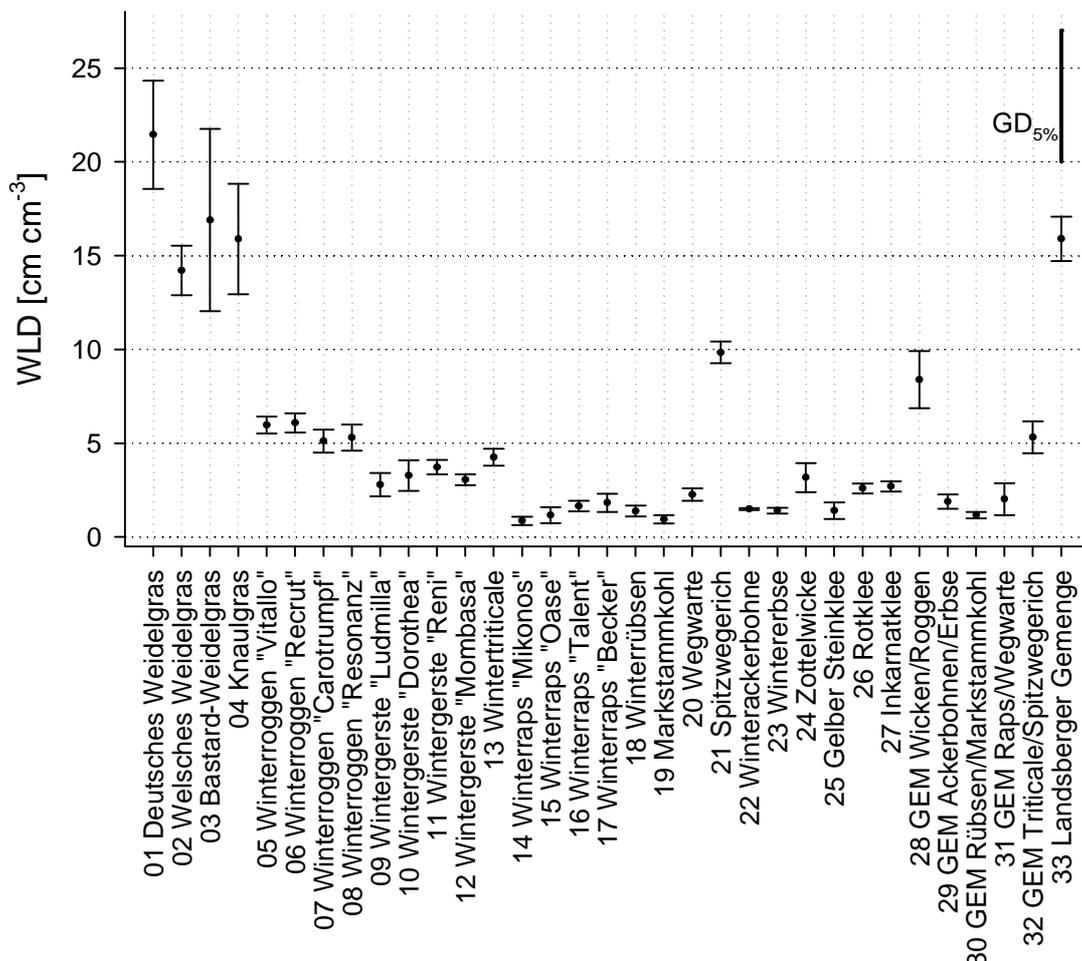


Abbildung 10: Wurzellängendichte im Mai 2007 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $7 \text{ cm cm}^{-3}$ .

Signifikant unterschiedlich hingegen waren die WLD zwischen Futtergrasarten und den Getreide-Varianten sowie den Brassica-Varianten und den Leguminosen. Unter den Getreidevarianten zeigten die Roggensorten etwas höhere WLD als Triticale, diese wiederum lag leicht oberhalb der Wintergerstensorten (alle Vergleiche nicht signifikant). Die WLD der Kreuzblütler lagen leicht unter den Getreidevarianten; statistisch abgesicherte Unterschiede zwischen den Arten und Sorten gab es auch hier nicht. Bei den Leguminosen zeigte Zottelwicken, Rotklee und Inkarnatklee leicht höhere WLD als Winterackerbohnen, Wintererbsen und Gelber Steinklee.

Die gemessene WLD in der Tiefenschicht von 30 bis 60 cm im Mai 2007 erbrachte weitgehend die gleiche Rangfolge wie in der oberen Bodenschicht (Abbildung 11). Hohe WLD wurden bei Futtergrasarten und Landsberger Gemenge gemessen. Deutsches Weidelgras ( $11,7 \text{ cm cm}^{-3}$ ), Knaulgras ( $9,2 \text{ cm cm}^{-3}$ ), Bastard-Weidelgras ( $8,8 \text{ cm cm}^{-3}$ ) zeig-

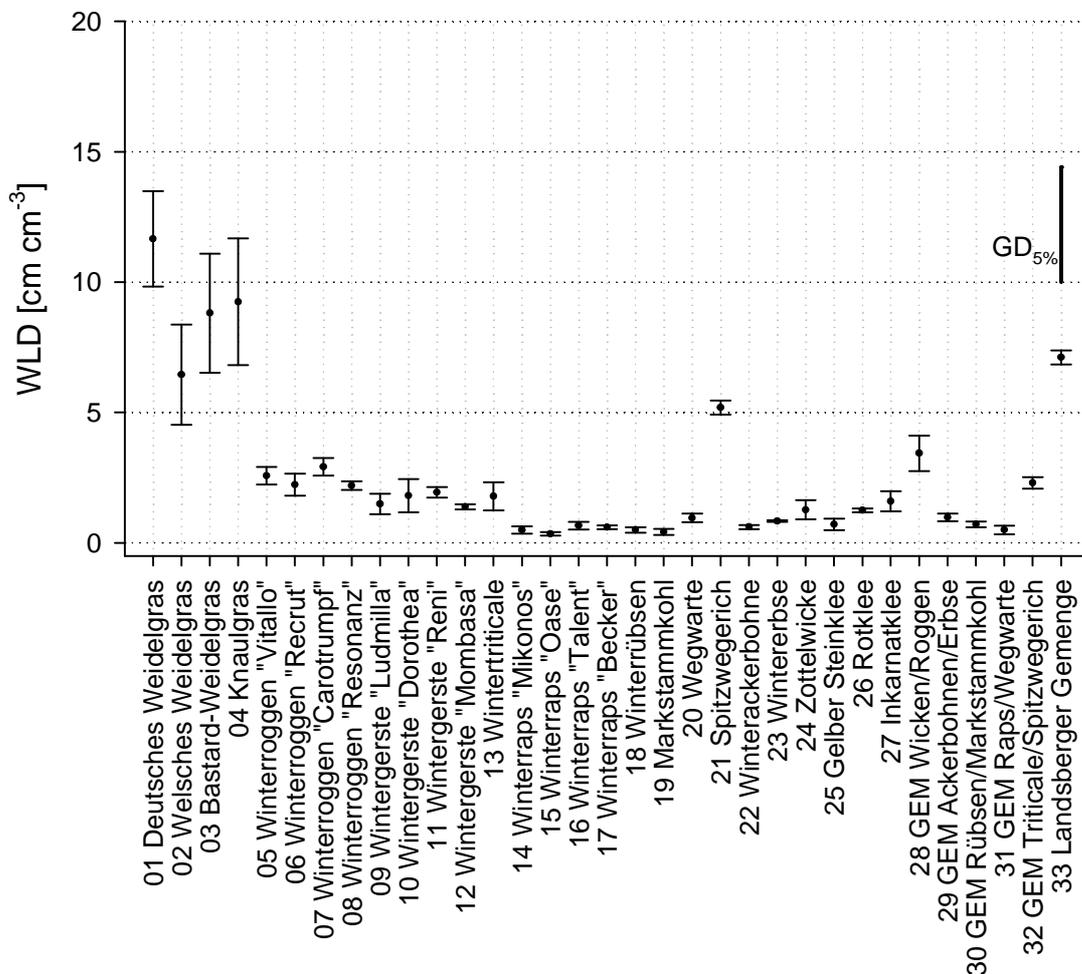


Abbildung 11: Wurzellängendichte im Mai 2007 in der Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $4,4 \text{ cm cm}^{-3}$ .

ten keine signifikant höheren Werte als Landsberger Gemeinde (7,1 cm cm<sup>-3</sup>), Welsches Weidelgras (6,5 cm cm<sup>-3</sup>) und Spitzwegerich (5,2 cm cm<sup>-3</sup>). Hingegen waren die WLD der drei erstgenannten Varianten signifikant höher als die WLD aller weiteren Prüfglieder. Die WLD der Getreide-Varianten war leicht höher als die WLD der Kreuzblütler, deren Werte recht homogen bei 0,3 cm cm<sup>-3</sup> bis 0,7 cm cm<sup>-3</sup> lagen. Signifikante Unterschiede zwischen den geprüften Sorten wurden weder bei Gerste noch bei Roggen und Raps gefunden.

### Zweites Versuchsjahr

Im Dezember 2007 waren die Weidelgras-Varianten und das Landsberger Gemeinde die Versuchsglieder mit den höchsten WLD; sie lagen signifikant höher als die übrigen Prüf-

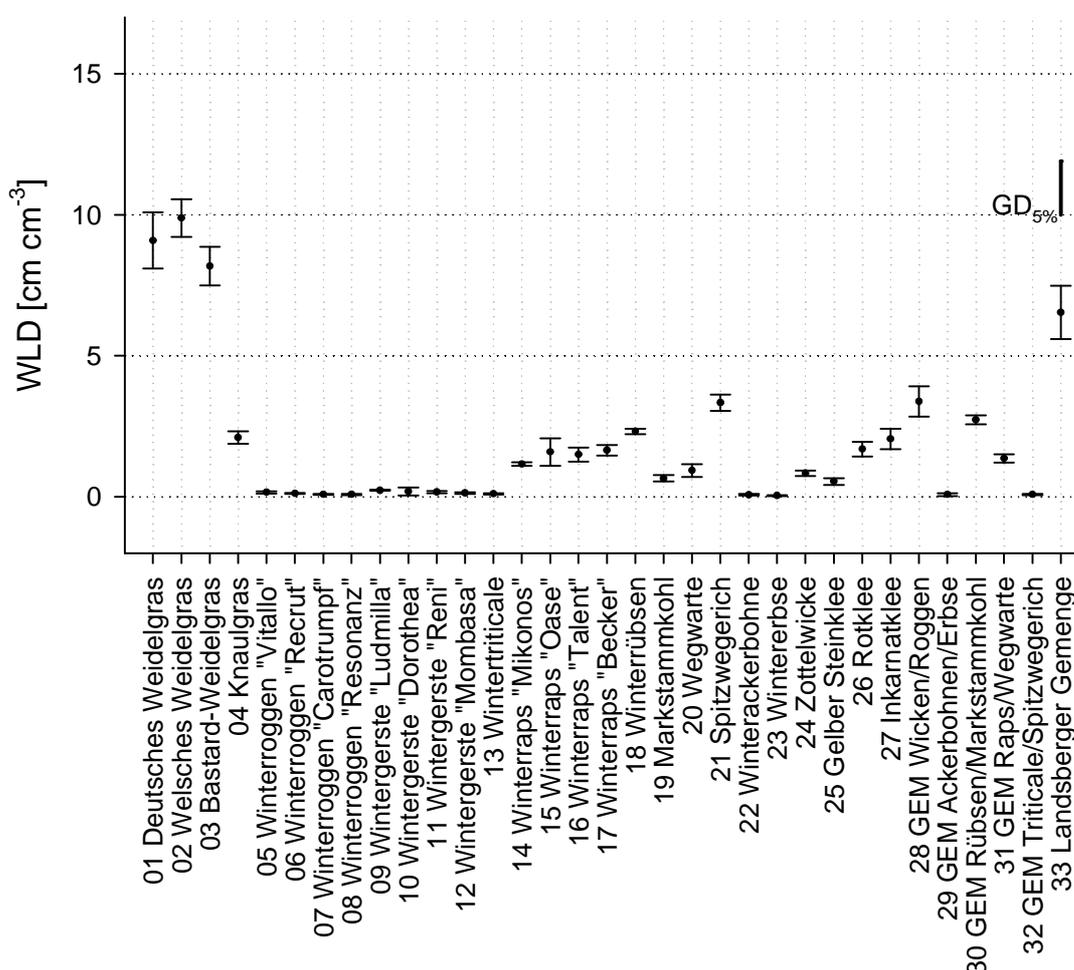


Abbildung 12: Wurzellängendichte im Dezember 2007 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 1,8 cm cm<sup>-3</sup>.

glieder (Abbildung 12). Welsches Weidelgras (9,9 cm cm<sup>-3</sup>) lag dabei vor Deutschem Weidelgras (9,1 cm cm<sup>-3</sup>), Bastard-Weidelgras (8,2 cm cm<sup>-3</sup>) und Landsberger Gemeinde (6,5 cm cm<sup>-3</sup>). Mit deutlich geringeren Werten folgten das Gemeinde Wicken/Roggen (3,4

cm cm<sup>-3</sup>) und Spitzwegerich (3,3 cm cm<sup>-3</sup>). Das Knaulgras hatte nur eine WLD von 2,1 cm cm<sup>-3</sup> und war damit etwa auf dem Niveau der Kreuzblütler. Diese zeigten Werte von 2,3 cm cm<sup>-3</sup> bei Winterrüben und 0,7 cm cm<sup>-3</sup> bei Markstammkohl. Das Gemenge Rüb- sen/Markstammkohl (2,7 cm cm<sup>-3</sup>) war signifikant höher als Markstammkohl in Reinsaat. Sehr geringe WLD wurden bei den Getreide-Varianten, den Winterackerbohnen und Win- tererbsen gemessen; sie lagen unter 0,2 cm cm<sup>-3</sup>. Unter den Leguminosen übertrafen die Varianten Inkarnatklee und Rotklee die übrigen Leguminosen leicht.

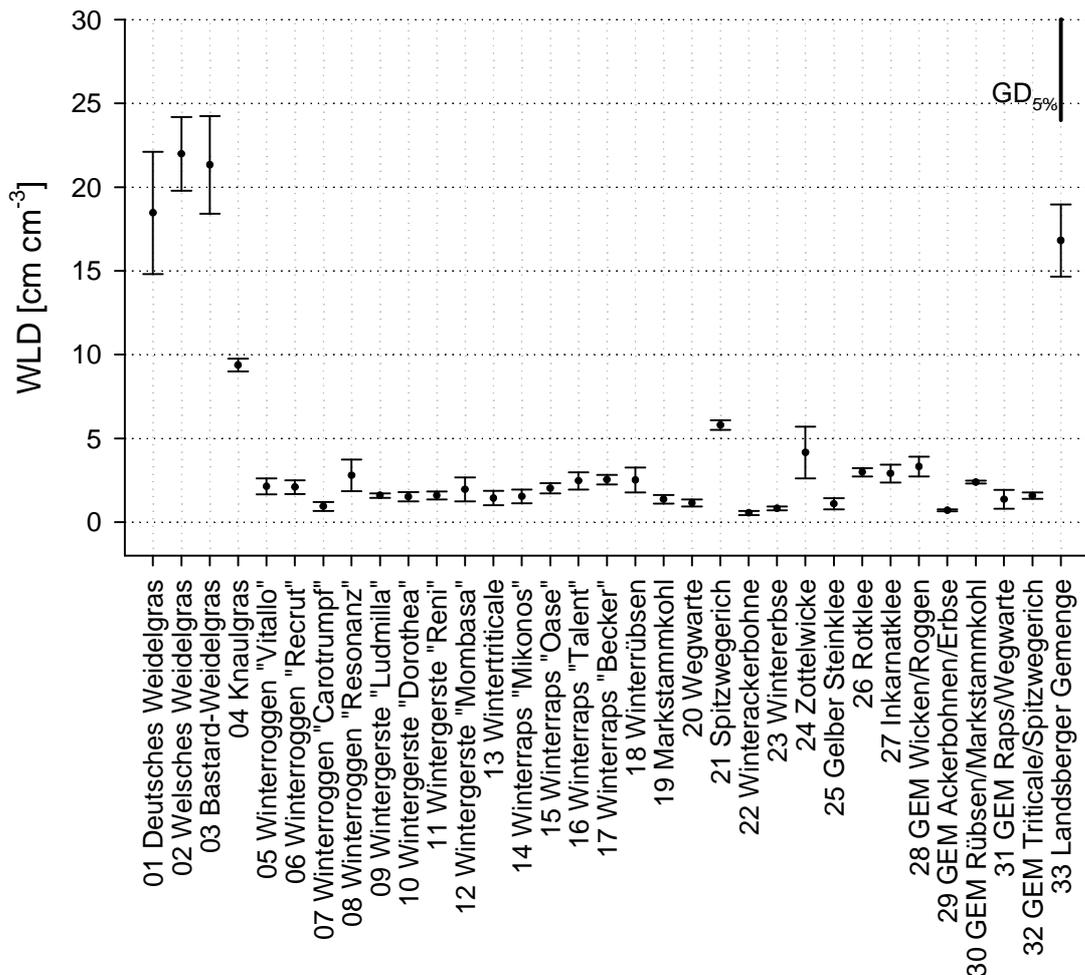


Abbildung 13: Wurzellängendichte im Mai 2008 in der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 5,8 cm cm<sup>-3</sup>.

In der Zeit vom Dezember bis zum Mai 2008 haben die WLD in 0 bis 30 cm höhere Werte erreicht; nur wenig veränderte sich jedoch die Rangfolge der Prüfglieder (Abbildung 13). Die Weidelgras-Varianten sowie das Landsberger Gemenge hatten erneut die größten Werte. Welsches Weidelgras hatte nun mit 22 cm cm<sup>-3</sup> einen leichten Vorsprung vor Bastard-Weidelgras (21,3 cm cm<sup>-3</sup>), Deutschem Weidelgras (18,5 cm cm<sup>-3</sup>) und Landsberger Gemenge (16,8 cm cm<sup>-3</sup>). Diese vier Varianten besaßen signifikant höhere WLD als die

übrigen Prüfglieder. Des Weiteren war die WLD bei Knautgras mit  $9,4 \text{ cm cm}^{-3}$  höher als Spitzwegerich ( $5,8 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Zottelwicken ( $4,2 \text{ cm cm}^{-3}$ ); zu den übrigen Varianten war die WLD des Knautgrases sogar statistisch signifikant höher. Die Werte der Wintergetreide-Varianten lagen zwischen  $0,9 \text{ cm cm}^{-3}$  bei der Roggensorte „Carotrumpf“ und  $2,7 \text{ cm cm}^{-3}$  bei der Roggensorte „Resonanz“; signifikante Differenzen wurden nicht sichtbar. Ebenfalls recht homogen war die WLD der Kreuzblütler, auch hier waren keine signifikanten Differenzen aufgetreten. Die Leguminosen Zottelwicken, Inkarnatkiee und Rotkiee hatten leicht höhere WLD als Winterackerbohnen, Wintererbsen und Gelber Steinklee.

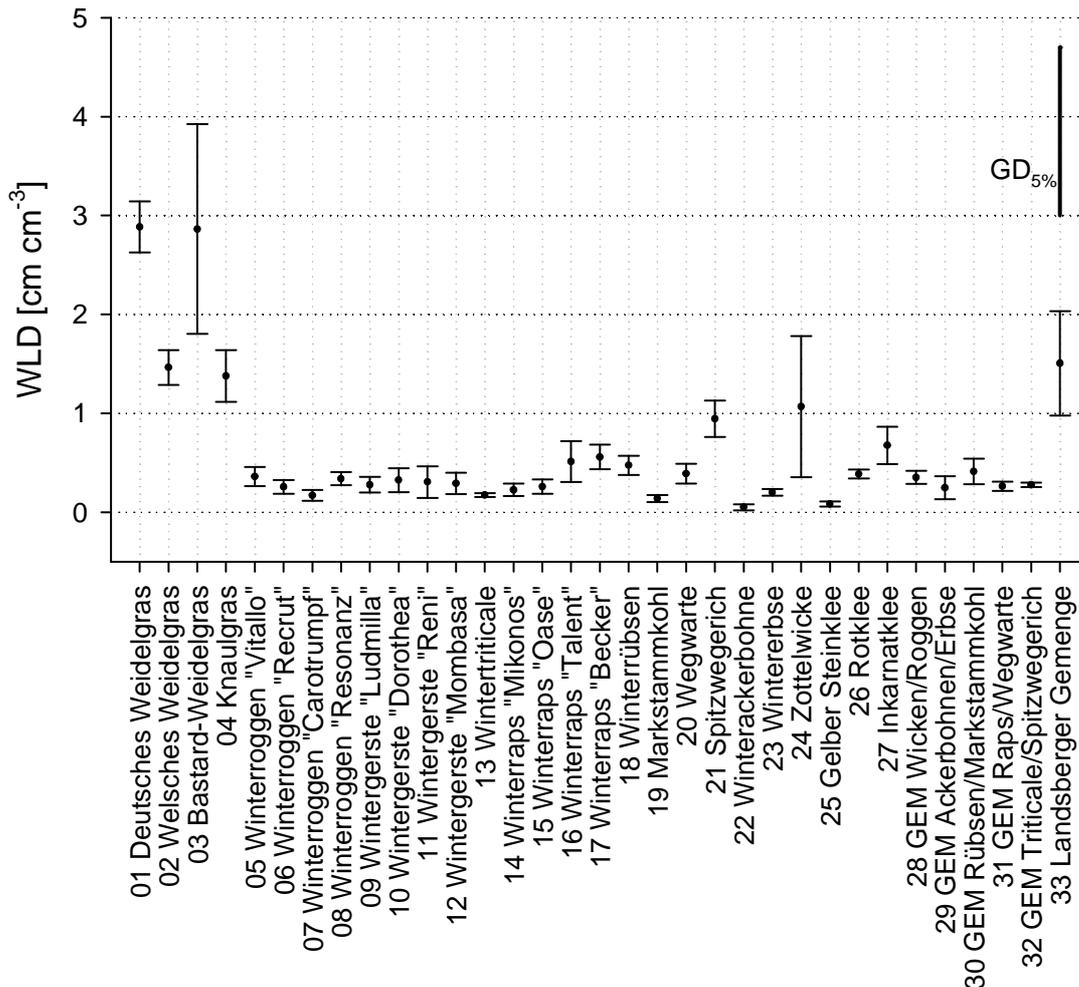


Abbildung 14: Wurzellängendichte im Mai 2008 in der Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm. Dargestellt ist der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwertes.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $1,7 \text{ cm cm}^{-3}$ .

Im Mai 2008 wurden sehr viel geringere Wurzellängendichten in der unteren Tiefenschicht (30 bis 60 cm) als in der Schicht von 0 bis 30 cm gemessen (Abbildung 14). Auch hier hatten die Weidelgrasarten und das Landsberger Gemenge die höchsten Werte. Mit jeweils  $2,9 \text{ cm cm}^{-3}$  hatten das Deutsche Weidelgras und das Bastard-Weidelgras die höchsten Werte. Sie lagen über dem Landsberger Gemenge ( $1,5 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Bastard-

Weidelgras ( $1,5 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und signifikant über den Werten der übrigen Varianten. Knaulgras erreichte mit  $1,4 \text{ cm cm}^{-3}$  fast das Niveau der Weidelgras-Varianten. Auch Zottelwicken ( $1,1 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Spitzwegerich ( $0,9 \text{ cm cm}^{-3}$ ) lagen leicht über den Werten der Getreide- und Brassica-Varianten. Signifikante Differenzen zwischen den Sorten wurden weder bei Gerste und Roggen noch bei Winterraps gefunden. Bei den Leguminosen lagen erneut Zottelwicken und Inkarnatklée leicht über den Werten der übrigen Leguminosen. Die geringsten WLD wurden bei Gelbem Steinklee ( $0,08 \text{ cm cm}^{-3}$ ) und Winterackerbohnen ( $0,05 \text{ cm cm}^{-3}$ ) gemessen.

### 3.2.4 N in der Wurzelmasse

#### *Erstes Versuchsjahr*

Im Dezember 2006 wurden die größten Stickstoffmengen in der Wurzel-TM von Wegwarte mit  $35,2 \text{ kg N ha}^{-1}$  gemessen (Tabelle 23). In der Gruppe der Kreuzblütler lagen die Stickstoffmengen zwischen  $25,9 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Winterrübsen) und  $9,0 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Winterraps Variante „Becker“). Auch die Gemenge Rübsen/Markstammkohl ( $19,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Raps/Wegwarte ( $14,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) lagen in diesem Bereich. Leicht geringer war die Stickstoffmenge in den Wurzeln der Leguminosen; hier lag Gelber Steinklee ( $20,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) vor Rotklee ( $13,1 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Inkarnatklée ( $10,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Recht einheitlich mit  $8,6 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Bastard-Weidelgras) bis  $10,0 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Welsches Weidelgras) waren die Stickstoffmengen der Weidelgras-Varianten.

Im Mai 2007 befanden sich die größten wurzelgebundenen Stickstoffmengen bei den Winterackerbohnen ( $50,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und dem Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen ( $37,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Die Leguminosen Inkarnatklée ( $35,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), Zottelwicken ( $34,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Rotklee ( $34,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) waren ebenfalls stickstoffreiche Varianten; hingegen waren in den Wurzeln der Wintererbsen ( $15,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und des Gelben Steinklees ( $13,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) signifikant weniger Stickstoff als in den Wurzeln der Winterackerbohnen. Des Weiteren wurde bei den Weidelgras-Varianten mit  $24,1 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Welsches Weidelgras) bis  $31,8 \text{ kg N ha}^{-1}$  (Deutsches Weidelgras) hohe Stickstoffmengen gemessen. Etwa gleich hoch waren auch die Werte für Spitzwegerich ( $25,0 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Wegwarte ( $26,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). Die Kreuzblütler (außer Markstammkohl;  $31,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und die Getreidevarianten hatten mit Werten von  $9,6 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $20,9 \text{ kg N ha}^{-1}$  die geringsten Stickstoffmengen in den Wurzeln gespeichert.

Tabelle 23: Stickstoffmengen im unterirdischen Pflanzenmaterial an vier Beprobungs-terminen [kg N ha<sup>-1</sup>].

Variante	Dez 06	Mai 07	Dez 07	Mai 08
01 Deutsches Weidelgras	8,7	31,8	10,3	22,2
02 Welsches Weidelgras	10,0	24,1	10,0	19,2
03 Bastard-Weidelgras	8,6	28,8	8,4	19,3
04 Knaulgras	6,2	19,3	4,0	10,8
05 Winterroggen "Vitallo"	2,5	13,9	0,5	4,9
06 Winterroggen "Recrut"	2,0	18,9	0,6	7,0
07 Winterroggen "Carotrumpf"	1,2	11,1	0,2	4,0
08 Winterroggen "Resonanz"	1,9	14,4	0,2	3,8
09 Wintergerste "Ludmilla"	2,7	16,1	0,8	3,9
10 Wintergerste "Dorothea"	1,9	9,6	0,8	4,5
11 Wintergerste "Reni"	1,9	15,2	0,5	3,9
12 Wintergerste "Mombasa"	1,5	13,5	0,4	6,8
13 Wintertriticale	0,8	13,6	0,4	3,8
14 Winterraps "Mikonos"	17,9	8,0	11,0	13,2
15 Winterraps "Oase"	19,0	18,6	20,2	9,9
16 Winterraps "Talent"	9,0	20,9	16,6	21,5
17 Winterraps "Becker"	14,4	18,4	26,3	19,1
18 Winterrübsen	25,9	12,7	19,1	17,2
19 Markstammkohl	23,6	31,6	2,8	14,1
20 Wegwarte	35,2	26,6	22,0	12,0
21 Spitzwegerich	8,9	25,0	12,2	15,8
22 Winterackerbohnen	5,1	50,4	1,2	23,2
23 Wintererbsen	1,5	15,3	0,4	10,5
24 Zottelwicken	5,8	34,8	8,1	24,8
25 Gelber Steinklee	20,2	13,5	5,8	7,1
26 Rotklee	13,1	34,3	25,0	30,0
27 Inkarnatklee	10,9	35,8	12,9	17,9
28 GEM Wicken/Roggen	10,2	17,8	11,2	12,0
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	4,2	37,2	0,3	19,6
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	19,6	22,0	26,7	23,3
31 GEM Raps/Wegwarte	14,2	31,0	11,7	8,4
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	0,9	12,4	0,3	4,3
33 Landsberger Gemenge	8,7	23,0	11,7	29,7
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	20,5	27,0	18,7	21,6

Im Dezember 2007 wurden die höchsten Stickstoffmengen bei dem Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl (26,7 kg N ha<sup>-1</sup>), Winterraps (Variante „Becker“ 26,3 kg N ha<sup>-1</sup>), Rotklee (25,0 kg N ha<sup>-1</sup>) und Wegwarte (22 kg N ha<sup>-1</sup>) gemessen. Die Stickstoffmengen in den Wurzeln der Weidelgras-Varianten lagen mit Werten zwischen 8,4 kg N ha<sup>-1</sup> (Bastard-Weidelgras) und 10,3 kg N ha<sup>-1</sup> (Deutsches Weidelgras) leicht unterhalb der Werte bei den Kreuzblütlern aber deutlich über den Werten der Getreide-Varianten.

Im Mai 2008 waren die Stickstoffmengen der Wurzeln von Rotklee ( $30 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Landsberger Gemenge ( $29,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) am höchsten. Die Werte der Leguminosen Zottelwicken ( $24,8 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), Winterackerbohnen ( $23,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und Inkarnatklee ( $17,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) lagen tendenziell leicht über den Werten der Weidelgras-Varianten ( $19,2 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $22,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und die Werte der Weidelgras-Varianten lagen leicht über den Kreuzblütlern ( $9,9 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $21,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

### 3.3 Nmin-Werte

#### *Erstes Versuchsjahr*

Die erste Erfassung der Nmin-Werte erfolgte wenige Tage nach der Aussaat der Winterzwischenfrüchte im August bzw. September 2006. Die gemessenen Werte lagen im Mittel über alle 34 Varianten bei  $68 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ .

Im Dezember 2006 waren die gemessenen Nmin-Werte uneinheitlich; unter einigen Varianten befand sich weniger mineralisierter Stickstoff als im September, andere wiederum zeigten höhere Werte (Abbildung 15). Zu den Varianten, die den Nmin-Wert senken konnten, zählten häufig die früh gesäten Prüfglieder. Besonders gering waren die Nmin-Werte bei den Kreuzblütlern und bei den Gemengen mit Kreuzblütlern. Der kleinste Wert wurde bei Winterraps der Sorte „Mikonos“ mit  $15,3 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  gemessen. Auch die Weidelgras-Varianten, Knautgras und Spitzwegerich hatten geringe Nmin-Werte im Dezember 2006; insbesondere Welsches Weidelgras hatte mit  $20,2 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  nur wenig höhere Messwerte als Raps. Die Gruppe der Leguminosen zeigte ein ungleiches Bild. Die Varianten Zottelwicken sowie alle Klee-Varianten hatten geringere Nmin-Werte als im September; wobei die Werte in der Größenordnung von  $20 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  über den Kreuzblütlern lagen. Die Varianten Winterackerbohnen ( $108,5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ), Wintererbsen ( $107,5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) sowie das Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen ( $112,1 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) hatten etwa um  $40 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  höhere Werte als die genannten übrigen Leguminosen und wichen von diesen signifikant ab. Sie lagen ferner leicht über den Werten der Schwarzbrache ( $99,2 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) und dem Gemenge aus Wintertriticale und Spitzwegerich ( $94,4 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ). Ebenfalls recht hohe Nmin-Werte wurden bei den Getreide-Varianten gefunden, diese waren signifikant höher als die Werte der Weidelgrasarten und der Kreuzblütler.

Betrachtet man die Veränderungen in den drei Tiefenschichten, so fällt auf, dass bei den Kreuzblütlern die Nmin-Werte in der untersten Tiefenschicht tendenziell geringer waren als bei den übrigen Prüfgliedern. Bei den Varianten mit höheren Nmin-Werten waren besonders die Werte der oberen zwei Bodenschichten höher als bei den Varianten mit geringen Nmin-Werten, während die Nmin-Werte der unteren Bodenschicht nur geringe Veränderungen zeigten.

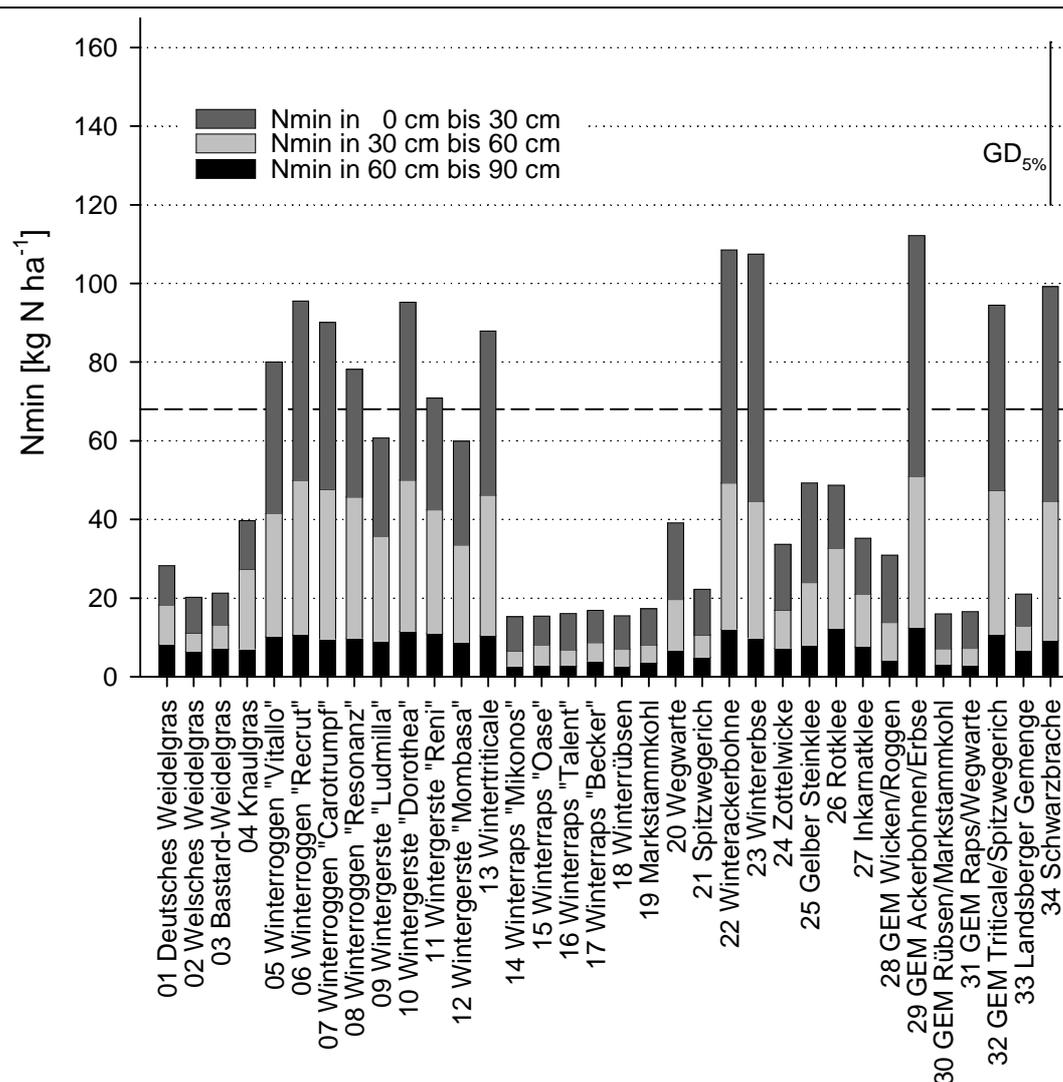


Abbildung 15: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Dezember 2006. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) = 41,4 kg Nmin ha<sup>-1</sup>. Die gestrichelte Linie stellt den mittleren Nmin-Wert zum Zeitpunkt der Aussaat (0 cm bis 90 cm) dar.

Die Untersuchung des Bodens im März 2007 erbrachte weiterhin geringe Nmin-Werte von etwa 13 bis 18 kg Nmin ha<sup>-1</sup> für die Kreuzblütler und Weidelgras-Varianten (Abbildung 16). Es zeigte sich, dass die Varianten Knauigras, Spitzwegerich, das Gemenge aus Wicken und Roggen und auch das Landsberger Gemenge Nmin-Werte von weniger als 20 kg Nmin ha<sup>-1</sup> aufwiesen. Leicht höher und nicht so homogen waren die Nmin-Werte bei den Getreide-Varianten. Hier fiel besonders die Gerstensorte „Dorothea“ auf, deren Nmin-Wert höher war als der Wert der anderen Getreide-Varianten, außerdem war er signifikant höher als bei der Gerstensorte „Mombasa“. Bei den Leguminosen wurden die geringsten Nmin-Werte bei den Varianten Zottelwicken (20,4 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und Inkarnatklee (20,0 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) gemessen. Signifikant höher waren die Werte für Winterackerbohnen (50,7 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), Wintererbsen (70,3 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und für das Gemenge aus Winteracker-

bohnen und Wintererbsen ( $56,4 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ). Der höchste Nmin-Wert wurde unter Schwarzbrache ( $76,7 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) gemessen.

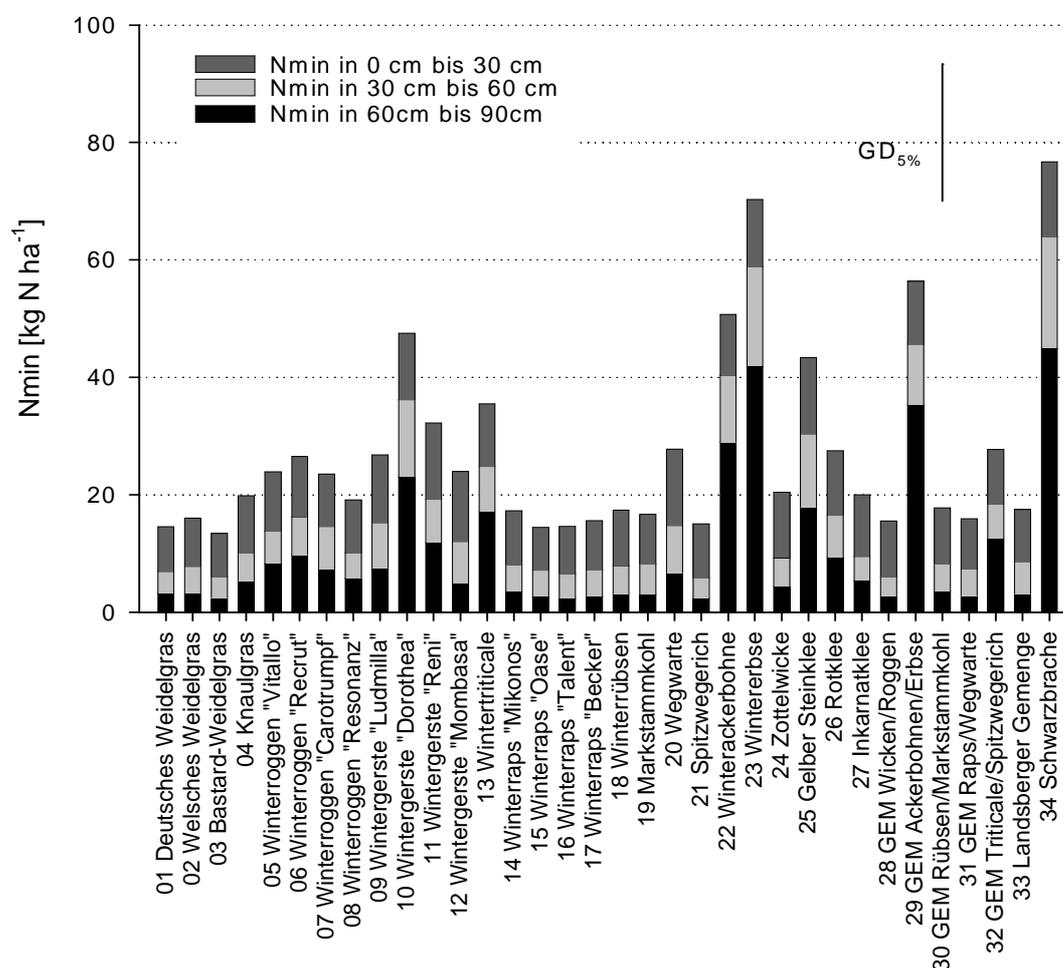


Abbildung 16: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im März 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $22,3 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ .

Ordnet man die Nmin-Werte den verschiedenen Tiefenschichten zu, so fällt auf, dass bei den Varianten mit höheren Nmin-Werten (Varianten 22, 23, 29, 34), die höchsten Nmin-Anteile in der untersten Tiefenschicht vorlagen; bei diesen Varianten waren etwa 60 Prozent des mineralisierten Stickstoffs in der Bodenschicht von 60 cm bis 90 cm vorhanden.

Im April 2007 konnten zwischen den Futtergrasarten, den Getreidearten, allen Kreuzblütlern und den Kräutern keine nennenswerten Unterschiede in den Beträgen an mineralisiertem Stickstoff im Boden festgestellt werden; die Nmin-Werte in der Bodenschicht von 0 cm bis 90 cm Tiefe lagen bei allen Varianten bei etwa  $20 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  (Abbildung 17). Auch lagen Zottelwicken und die Gemenge aus Wicken und Roggen, Rübsen und Markstammkohl, Raps und Wegwarte, Triticale und Spitzwegerich sowie das Landsberger Ge-

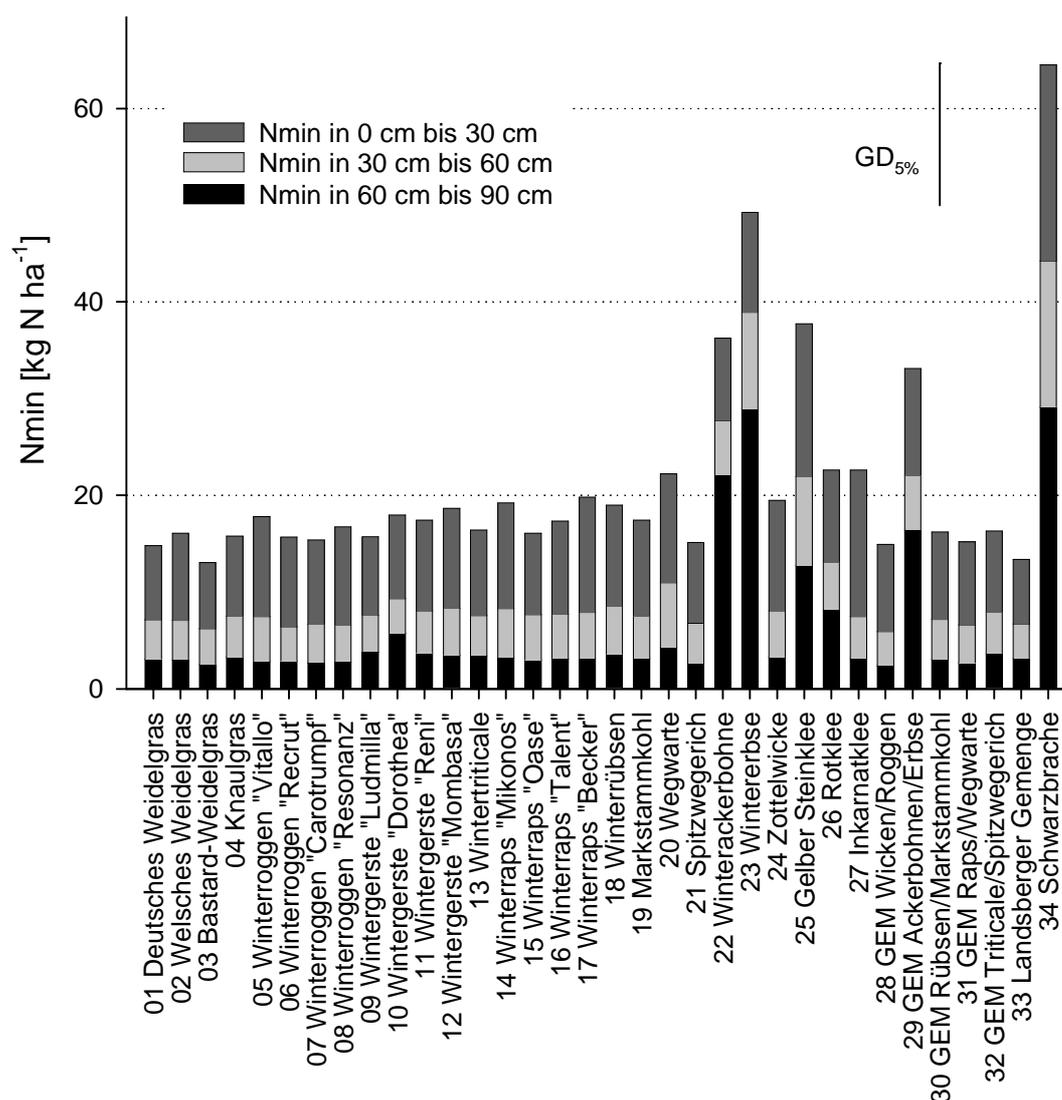


Abbildung 17: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im April 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 14,7 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

menge in diesem Bereich. Hohe Nmin-Werte wurden unter Schwarzbrache (64,5 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), Wintererbsen (49,2 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), Gelbem Steinklee (37,8 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), Winterackerbohnen (36,3 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (33,1 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) gemessen. Die genannten Varianten mit höheren Gesamt-Nmin-Werten hatten bis auf „Schwarzbrache“ keine größeren Stickstoff-Werte in den oberen beiden Bodenschichten als die übrigen Prüfglieder, allerdings war bei diesen Varianten der Nmin-Wert in der unteren Bodenschicht von 60 cm bis 90 cm Tiefe deutlich größer. Bei der Schwarzbrache waren die Stickstoffmengen in jeder geprüften Bodenschicht höher als bei den übrigen Varianten.

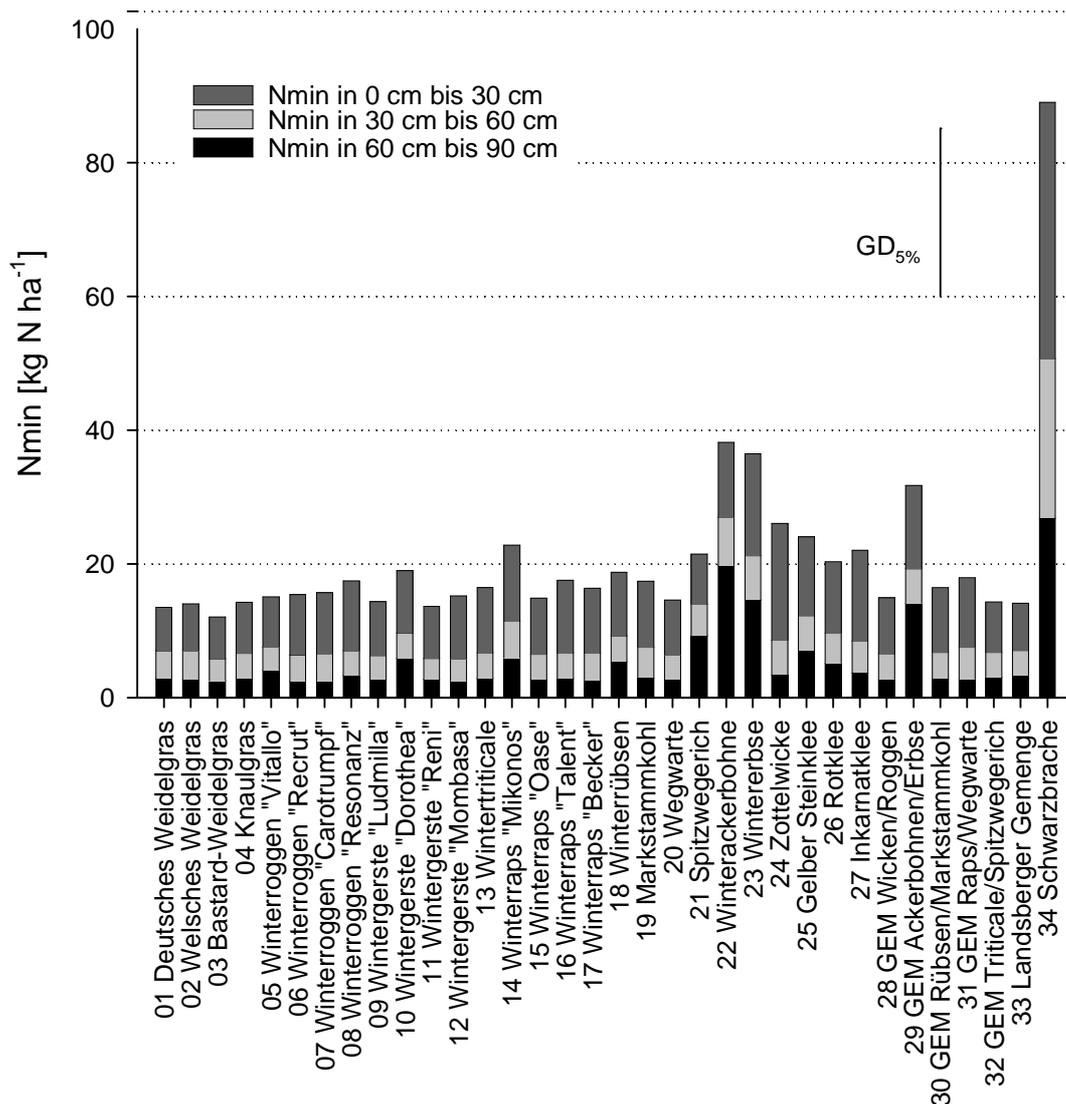


Abbildung 18: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Mai 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) = 25,1 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

Signifikant höher als alle anderen Varianten im Mai 2007 war der Nmin-Wert der Schwarzbrache (Abbildung 18). Mit 89,0 kg Nmin ha<sup>-1</sup> war er mehr als 50 kg Nmin ha<sup>-1</sup> höher als die zweithöchste Variante. Leicht höher als die Nmin-Werte der übrigen Prüfglieder waren die Werte der Winterackerbohnen (38,2 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), der Wintererbsen (36,4 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und des Gemenges aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (31,7 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), allerdings war die Differenz in keinem Vergleich signifikant. Unter den Nicht-Leguminosen waren die Nmin-Werte annähernd gleich groß; die Wintertrapsorte „Mikonos“ zeigte einen leicht höheren Wert als die übrigen Varianten.

Die Nmin-Werte der oberen Bodenschicht zeigten etwas höhere Werte bei den Leguminosen (nicht signifikant) im Vergleich zu den übrigen Prüfgliedern. Diese Tendenz war in der mittleren Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm nicht erkennbar; alle Varianten außer Schwarzbrache hatten hier etwa gleich hohe Nmin-Werte. In der Bodentiefe von 60 cm bis

90 cm unterschieden sich die Stickstoffmengen etwas stärker. Unter Schwarzbrache (26,9 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und unter Winterackerbohnen (19,8 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) waren die Nmin-Werte signifikant höher als bei den Nicht-Leguminosen. Des Weiteren war der Nmin-Wert bei Wintererbsen (14,6 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und bei dem Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen (14,1 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) in dieser Tiefenstufe höher als bei den Nicht-Leguminosen (nicht signifikant).

### Zweites Versuchsjahr

Die durchschnittlichen Nmin-Werte zur Aussaat des zweiten Versuchsdurchganges im August bzw. September 2007 lagen im Mittel bei 42,9 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

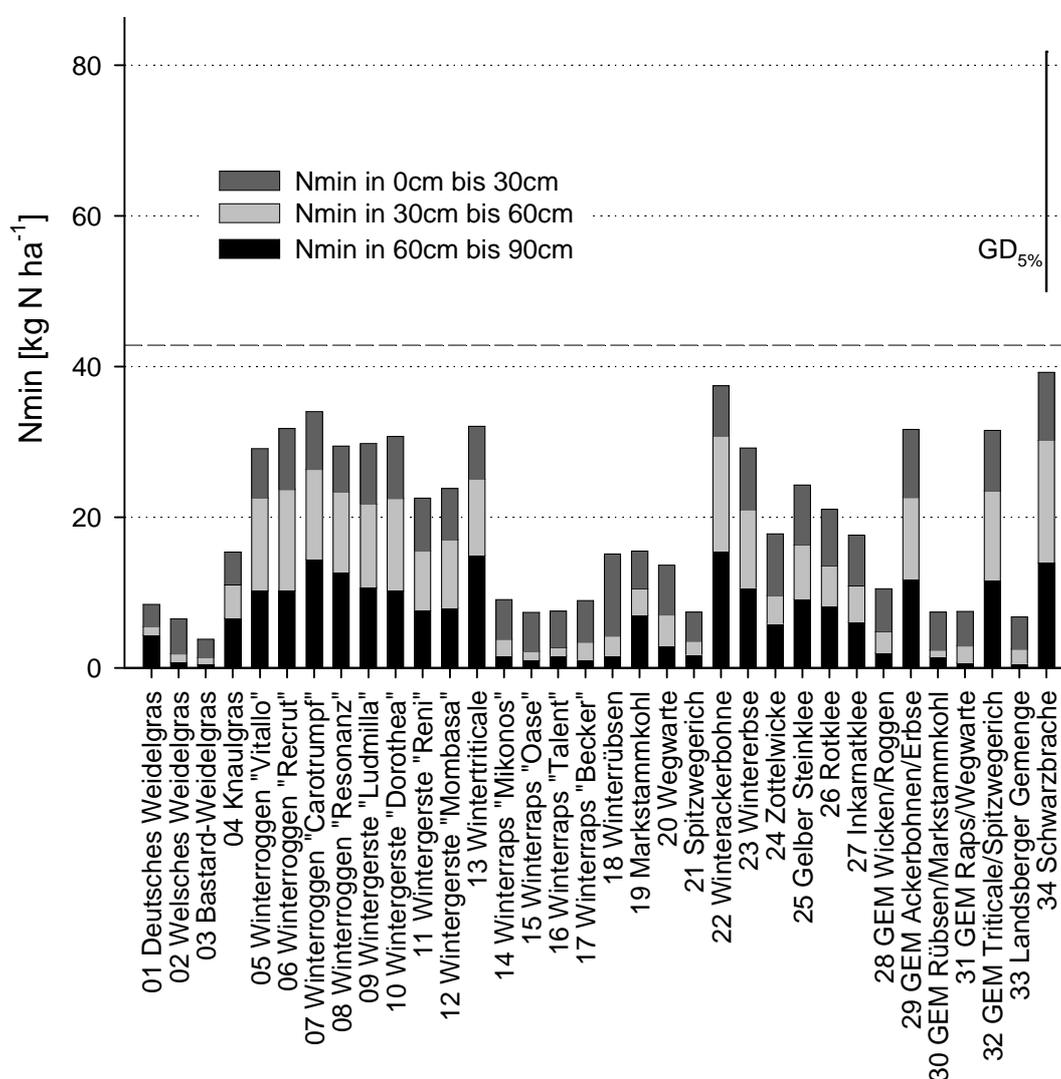


Abbildung 19: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Dezember 2007. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 31,8 kg Nmin ha<sup>-1</sup>. Die gestrichelte Linie stellt den mittleren Nmin-Wert zum Zeitpunkt der Aussaat (0 cm bis 90 cm) dar.

Im Dezember 2007 wurde unter sämtlichen Varianten weniger Stickstoff gemessen als im September 2007 (Abbildung 19). Besonders gering war der Wert bei Bastard-Weidelgras ( $3,8 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) Welschem Weidelgras ( $6,5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) und Landsberger Gemenge ( $6,8 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ). Die Nmin-Werte der Kreuzblütler waren ebenfalls gering, wobei die Werte der Raps-Varianten leicht unter den Werten von Markstammkohl und Rübsen lagen. Etwa auf dem gleichen geringen Niveau wie bei Raps war der Nmin-Wert bei Spitzwegerich ( $7,4 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ). Des Weiteren waren die Nmin-Werte aller Getreide-Varianten und des Gemenges Wintertriticale/Spitzwegerich höher als die Raps- und Weidelgras-Varianten. Die geringsten Werte der Leguminosen wurden bei den Varianten Inkarnatklie ( $17,6 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) und Zottelwicken ( $17,8 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) gemessen, während die Wintererbsen ( $29,2 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) und insbesondere die Winterackerbohnen ( $37,5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) fast das Niveau der Schwarzbrache ( $39,2 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) erreichten. Auffällig war zu diesem Termin (Dezember 2007) der hohe Betrag der Grenzdifferenz, der nur wenige signifikante Unterschiede anzeigte.

Die unterschiedlichen Beträge mineralisierten Stickstoffs der genannten Varianten sind besonders auf erhöhte Stickstoffmengen in der mittleren und unteren Bodenschicht zurückzuführen. In der Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm lagen die Werte aller geprüften Varianten recht homogen im Bereich von  $3,0 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  bis  $10,9 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ . In den Tiefenschicht 30 cm bis 60 cm und 60 cm bis 90 cm hingegen betrug die Nmin-Werte bei den Weidelgras-Varianten und Raps zwischen  $0,4 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  und  $2,3 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ , während die Getreide-Varianten, Winterackerbohnen, Wintererbsen und Schwarzbrache Werte im Bereich von  $10 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  bis  $16 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  zeigten (Abbildung 19).

Die nachfolgende Untersuchung des mineralisierten Bodenstickstoffs im März 2008 ergab bei vielen Varianten höhere Werte als bei der vorherigen Untersuchung im Dezember (Abbildung 20). Der höchste Wert wurde nun bei dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen ( $46,2 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) gemessen. Des Weiteren waren die Nmin-Werte unter Schwarzbrache ( $45,6 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ), Gelbem Steinklee ( $43,3 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ), Wintererbsen ( $39,0 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) und Winterackerbohnen ( $38,9 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ) recht hoch. Signifikant geringer waren die Nmin-Werte der drei Weidelgras-Varianten, Spitzwegerich und des Landsberger Gemenges, die Abweichungen der übrigen Prüfglieder waren statistisch nicht signifikant. Die Nmin-Werte der Kreuzblütler waren im März 2008 nur geringfügig kleiner als die Leguminosen Rotklee und Inkarnatklie; die Getreidearten hatten wiederum etwas höhere Nmin-Werte als die beiden Kleearten.

Bei der Zuordnung der Nmin-Werte zu den untersuchten Tiefenschichten wird deutlich, dass die Nmin-Werte der unteren Bodenschicht bei den Weidelgras-Varianten und den Kreuzblütlern leicht anstiegen im Vergleich zum Dezember 2007, während die Werte der übrigen Prüfglieder sich kaum veränderten. In der Bodenschicht 30 cm bis 60 cm war ebenfalls ein Anstieg bei den Weidelgras-Varianten und den Kreuzblütlern zu verzeichnen, sodass nun etwa alle Varianten (außer den Winterackerbohnen, Wintererbsen, Gel-

bem Steinklee und Schwarzbrache) das gleiche Niveau erreichten. In der obersten Bodenschicht stieg bei allen Varianten außer den Weidelgras-Varianten, Spitzwegerich und Landsberger Gemenge der Nmin-Wert vom Dezember 2007 zum März 2008 leicht an.

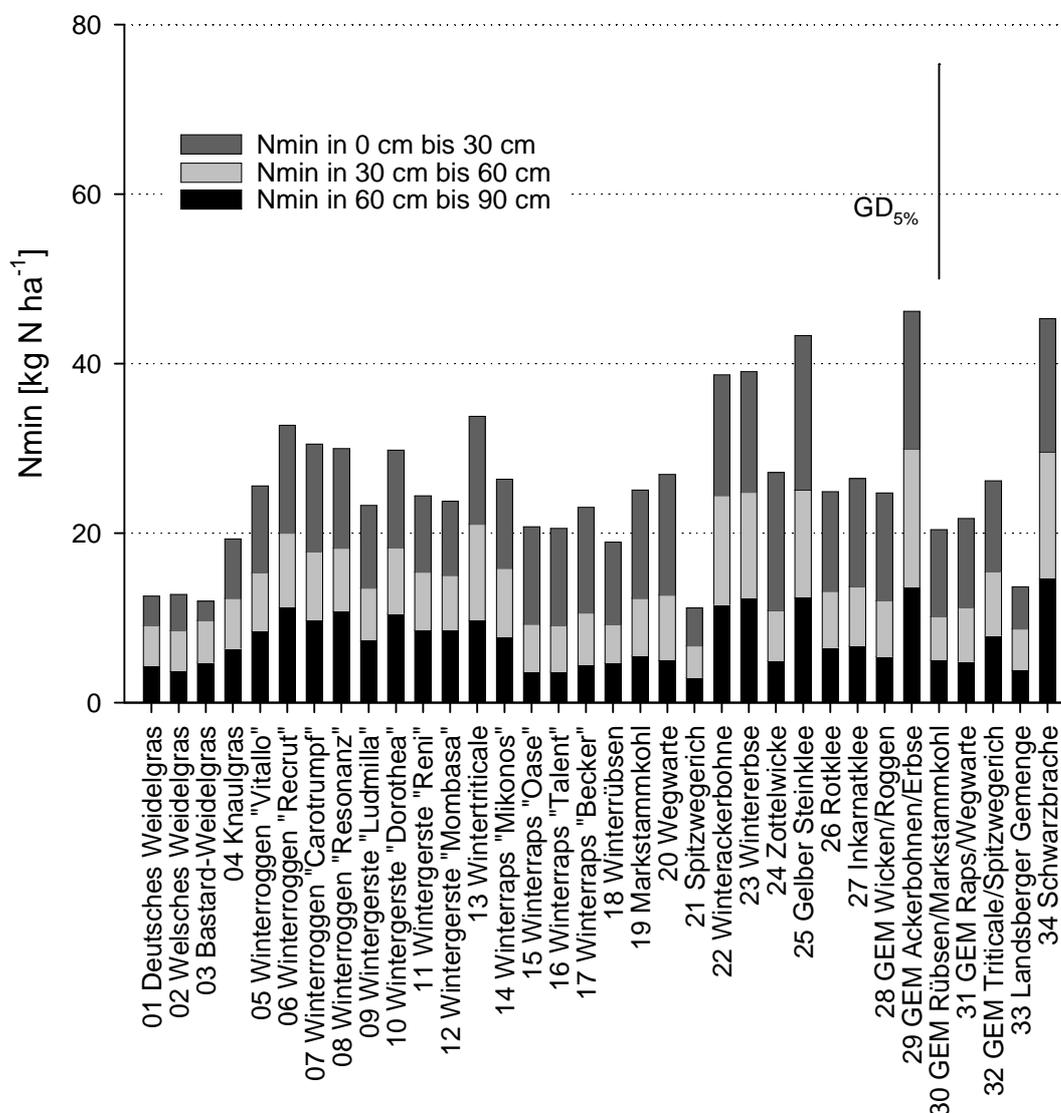


Abbildung 20: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im März 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 25,3 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

Im April 2008 wurde unter dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen mit 34,1 kg Nmin ha<sup>-1</sup> der höchste Nmin-Wert gemessen (Abbildung 21). Der Wert lag leicht über den Werten der Schwarzbrache (32,4 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), der Winterackerbohnen (31,9 kg Nmin ha<sup>-1</sup>), der Wintererbsen (28,3 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und des Gelben Steinklees (27 kg Nmin ha<sup>-1</sup>). Die Winterackerbohnen, das Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen und die Schwarzbrache hatten signifikant höhere Nmin-Werte als alle Nicht-Leguminosen und den Gemengen aus diesen Pflanzenarten (außer Wintertriticale). Die Nmin-Werte der Weidelgras-Varianten, Kräuter und Kreuzblütler waren am geringsten; leicht höher waren

die Werte der Getreide-Varianten. Inkarnatklee und Rotklee besaßen beide  $15,9 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ; damit befand sich hier signifikant weniger mineralisierter Bodenstickstoff als unter Schwarzbrache.

Die Stickstoffmengen waren bei den Varianten mit geringen Nmin-Werten in der Regel im untersten Bodenbereich von 60 cm bis 90 cm am geringsten und überstiegen selten  $5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ . In der Bodenschicht von 30 cm bis 60 cm waren die Stickstoffmenge recht gleich bei 3 bis  $5 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ , während sie im oberen Boden leicht höher, aber auch hier nur selten größer als  $7 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  war (Abbildung 21). Bei den Varianten Winterackerbohnen, Wintererbsen, dem Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen, Gelbem Steinklee und Schwarzbrache lagen die Werte in allen drei Tiefenschichten bei etwa  $10 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ .

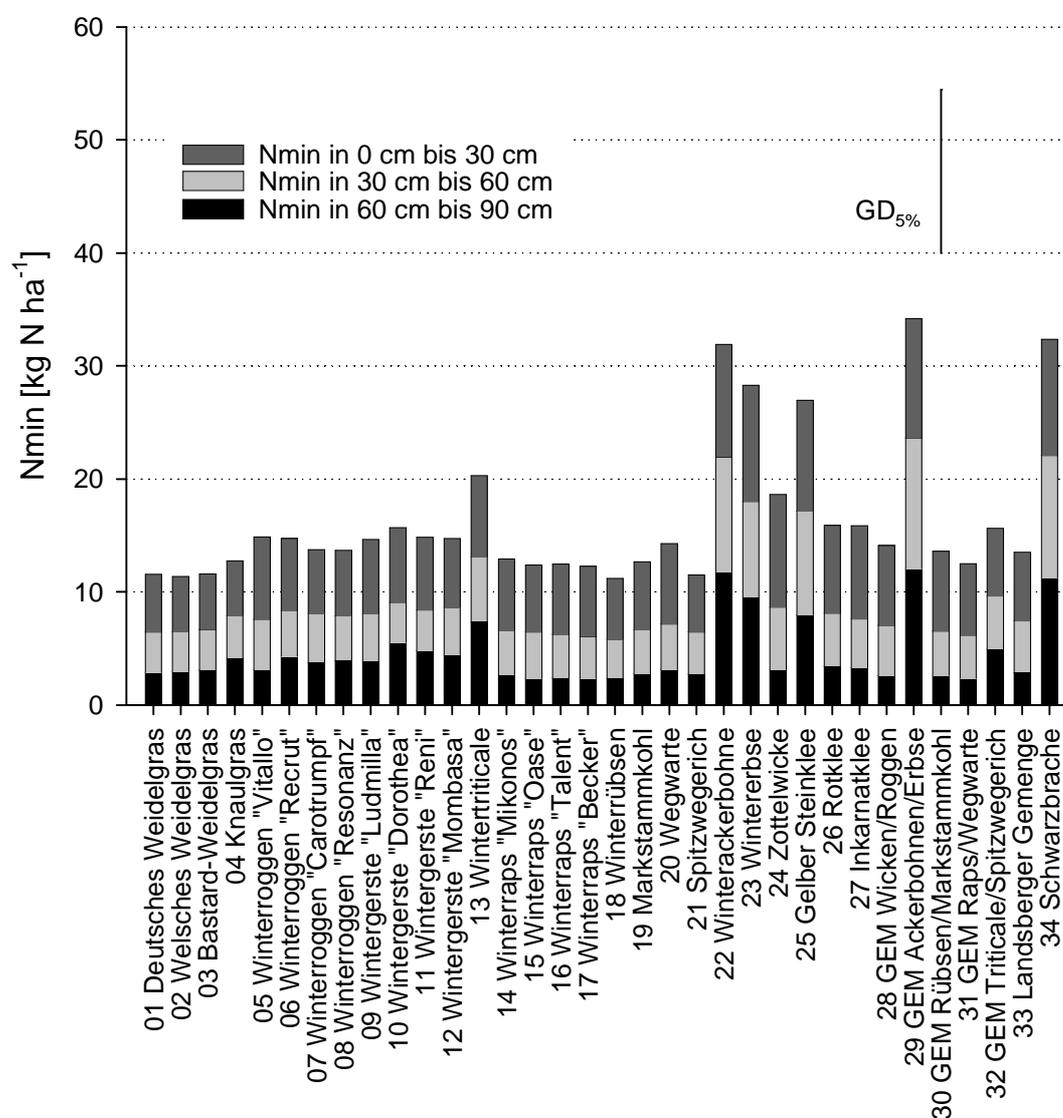


Abbildung 21: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im April 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule.  $GD_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $14 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ .

Zum Ende der zweiten Versuchsdurchführung im Mai 2008 wurde der geringste Nmin-Wert bei Wegwarte (10,7 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) gemessen (Abbildung 22). Werte im Bereich von 10,8 kg Nmin ha<sup>-1</sup> bis 16,2 kg Nmin ha<sup>-1</sup> wurden des Weiteren für alle übrigen Varianten, außer den Leguminosen, dem Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen und der Schwarzbrache gemessen. Signifikant höher als bei den Nicht-Leguminosen war der Nmin-Wert bei den Winterackerbohnen (26,1 kg Nmin ha<sup>-1</sup>). Ebenfalls hoch, statistisch signifikant jedoch nur gegenüber den Weidelgras-Varianten, den beiden Kräutern sowie dem Landsberger Gemenge, war der Nmin-Wert der Wintererbsen (22,9 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und des Gelben Steinklees (22,4 kg Nmin ha<sup>-1</sup>). Ferner hatten Inkarnatklee (20,5 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und Rotklee (16,7 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) höhere Werte als die Nicht-Leguminosen. Im Vergleich zu allen Varianten signifikant höher war der Nmin-Wert der Schwarzbrache mit 45,6 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

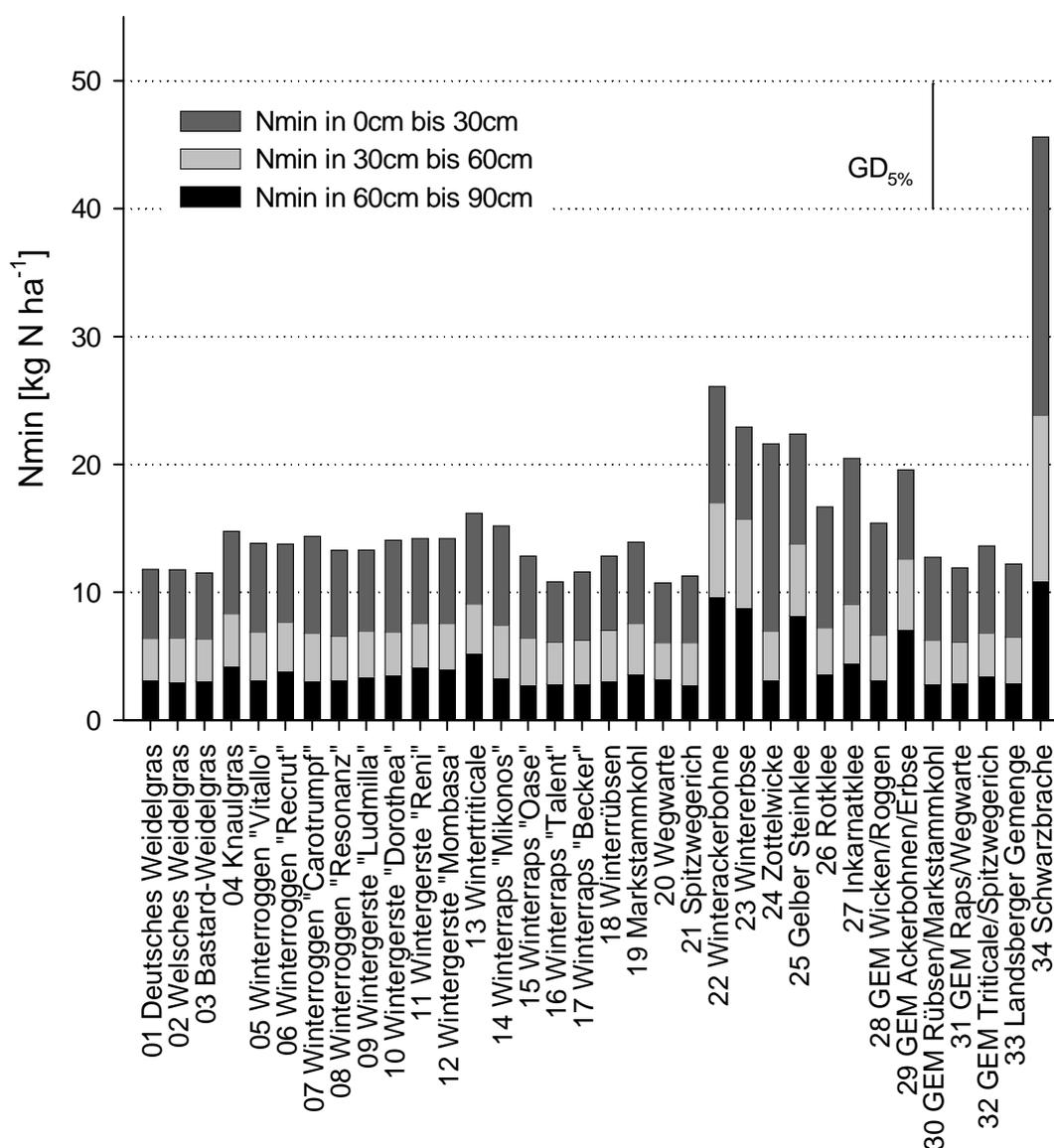


Abbildung 22: Nmin-Werte in drei Tiefenstufen im Mai 2008. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule. GD<sub>5%</sub> (Tukey-Test) = 9,5 kg Nmin ha<sup>-1</sup>.

Die N<sub>min</sub>-Werte in der oberen Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm unterschieden sich innerhalb der Gruppe der Nicht-Leguminosen nur wenig, sie lagen im Bereich von 5,1 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> (Bastard-Weidelgras) bis 7,8 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> (Winterraps Sorte „Mikonos“). Unter den Leguminosen wurden in dieser Tiefenschicht höhere Werte zwischen 7,1 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> (Winterackerbohnen) bis 14,6 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> (Zottelwicken) gemessen. Deutlich höher mit 21,8 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> war der Wert für Schwarzbrache. In der Tiefenschicht von 30 cm bis 60 cm gab es kaum Unterschiede zwischen den Leguminosen und den Nicht-Leguminosen. Alle Werte außer bei Winterackerbohnen (7,4 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>), Wintererbsen (7 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>) und Schwarzbrache (12,93 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>) befanden sich zwischen 2,8 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> und 5,6 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>. Die Werte in der untersten untersuchten Tiefenschicht waren unter den Nicht-Leguminosen einheitlich in einer Spanne von 2,8 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup> bis 4,1 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>; lediglich die Werte von Knautgras und Wintertriticale waren leicht höher. Deutlich höher waren die Stickstoff-Werte für Winterackerbohnen (9,7 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>), Wintererbsen (8,8 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>), Gelbem Steinklee (8,2 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>), dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (7,1 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>) und der Schwarzbrache (10,9 kg N<sub>min</sub> ha<sup>-1</sup>).

### 3.4 Abschätzung des symbiotisch fixierten Stickstoffs

#### *Erstes Versuchsjahr*

Winterackerbohnen konnten 252 kg N ha<sup>-1</sup> aus der symbiotischen Stickstofffixierung im Spross binden (Tabelle 24). Deutlich geringer war der durch Fixierung gewonnene Stickstoff bei Inkarnatklee (177 kg N ha<sup>-1</sup>) und Zottelwicken (138 kg N ha<sup>-1</sup>). Rotklee (104 kg N ha<sup>-1</sup>) und Wintererbsen (99 kg N ha<sup>-1</sup>) lagen vor Gelbem Steinklee (51 kg N ha<sup>-1</sup>). Die aus dem Boden aufgenommene Stickstoffmenge lag bei den großkörnigen Leguminosen (Winterackerbohnen, Wintererbsen) bei 49 bzw. 51 kg N ha<sup>-1</sup> und bei den kleinkörnigen

Tabelle 24: Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Mai 2007 (erweiterte Differenzmethode).

Variante	N aus symbiotischer Stickstoff-Fixierung [kg N ha <sup>-1</sup> ]	N aus dem Boden [kg N ha <sup>-1</sup> ]	Ndfa [%]
22 Winterackerbohnen	252	49	84
23 Wintererbsen	99	51	66
24 Zottelwicken	138	61	69
25 Gelber Steinklee	51	63	45
26 Rotklee	104	67	61
27 Inkarnatklee	177	65	73

Ndfa = Nitrogen derived from the atmosphere

Leguminosen (Zottelwicken, Gelber Steinklee, Rotklee und Inkarnatklee) zwischen 61 und 67 kg N ha<sup>-1</sup> (Tabelle 24). Den größten Anteil an symbiotisch fixiertem Stickstoff an der Gesamtstickstoffmenge (Ndfa) im Spross konnten Winterackerbohnen (84%) erzielen.

### Zweites Versuchsjahr

Im Mai 2008 wurde durch Inkarnatklee (188 kg N ha<sup>-1</sup>) und Rotklee (175 kg N ha<sup>-1</sup>) die größten Stickstoffmengen symbiotisch fixiert (Tabelle 25). Deutlich geringer war die Menge fixierten Stickstoffs bei den großkörnigen Leguminosen: Die Wintererbsen erreichten nur einen Wert von 77 kg N ha<sup>-1</sup> und die Winterackerbohnen von 55 kg N ha<sup>-1</sup>. Die weitaus geringste Stickstofffixierung wurde wieder beim Gelben Steinklee ermittelt (8 kg N ha<sup>-1</sup>). Die höchsten Ndfa-Werte wurden von Inkarnatklee (79%), Rotklee (77%) und Zottelwicken (74%) erreicht.

Tabelle 25: Abschätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Mai 2008 (erweiterte Differenzmethode).

Variante	N aus symbiotischer Stickstoff-Fixierung [kg N ha <sup>-1</sup> ]	N aus dem Boden [kg N ha <sup>-1</sup> ]	Ndfa [%]
22 Winterackerbohnen	55	43	56
23 Wintererbsen	77	46	63
24 Zottelwicken	138	47	74
25 Gelber Steinklee	8	47	14
26 Rotklee	175	52	77
27 Inkarnatklee	188	49	79

Ndfa = Nitrogen derived from the atmosphere

## 3.5 Korrelationen

### 3.5.1 Korrelationen zwischen den erfassten Merkmalen

#### *Erstes Versuchsjahr*

Der Korrelationskoeffizient zwischen der Spross-TM und den Nmin-Werten war stets negativ, ging aber mit zunehmender Versuchsdauer vom Betrag her zurück (Tabelle 26). Die engste Korrelation zwischen den genannten Merkmalen wurde im Dezember 2006 (-0,726) ermittelt; zum Mai 2007 betrug sie lediglich -0,228. Dieser Verlauf konnte auch für die Wurzel-TM gezeigt werden. Hier war der Betrag des Korrelationskoeffizienten zwi-

Tabelle 26: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Parameter des Versuchsjahres 2006/2007; n = 132; Korrelation nach Pearson.

Vergleichsgrößen		r	p
Spross-TM Dez 06	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 06	-0,726	<0,001
Spross-TM Dez 06	Wurzel-TM Dez 06	0,445	<0,001
Spross-TM Dez 06	WLD <sup>1</sup> (0 bis 30 cm) Dez 06	0,619	<0,001
WLD (0 bis 30 cm) Dez 06	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 06	-0,418	<0,001
Wurzel-TM Dez 06	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 06	-0,558	<0,001
Spross-TM Mrz 07	Nmin (0 bis 90 cm) Mrz 07	-0,500	<0,001
Spross-TM Apr 07	Nmin (0 bis 90 cm) Apr 07	-0,419	<0,001
Spross-TM Mai 07	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 07	-0,228	<0,01
Spross-TM Mai 07	Wurzel-TM (0 bis 60 cm) Mai 07	0,276	<0,01
Spross-TM Mai 07	WLD (0 bis 60 cm) Mai 07	0,278	<0,01
WLD (0 bis 60 cm) Mai 07	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 07	-0,269	<0,01
Wurzel-TM Mai 07	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 07	-0,231	<0,01

<sup>1</sup> = Wurzellängendichte

Tabelle 27: Korrelationskoeffizienten ausgewählter Parameter des Versuchsjahres 2007/2008; n = 132; Korrelation nach Pearson.

Vergleichsgrößen		r	p
Spross-TM Dez 07	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 07	-0,542	<0,001
Spross-TM Dez 07	Wurzel-TM Dez 07	0,650	<0,001
Spross-TM Dez 07	WLD <sup>1</sup> (0 bis 30 cm) Dez 07	0,691	<0,001
WLD (0 bis 30 cm) Dez 07	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 07	-0,476	<0,001
Wurzel-TM Dez 07	Nmin (0 bis 90 cm) Dez 07	-0,496	<0,001
Spross-TM Mrz 08	Nmin (0 bis 90 cm) Mrz 08	-0,405	<0,001
Spross-TM Apr 08	Nmin (0 bis 90 cm) Apr 08	-0,267	<0,01
Spross-TM Mai 08	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 08	-0,095	n.s. <sup>2</sup>
Spross-TM Mai 08	Wurzel-TM (0 bis 60 cm) Mai 08	0,415	<0,001
Spross-TM Mai 08	WLD (0 bis 60 cm) Mai 08	0,382	<0,001
WLD (0 bis 60 cm) Mai 08	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 08	-0,243	<0,01
Wurzel-TM Mai 08	Nmin (0 bis 90 cm) Mai 08	-0,229	<0,01

<sup>1</sup> = Wurzellängendichte; <sup>2</sup> = nicht signifikant

schen der Wurzel-TM und den Nmin-Werten im Dezember 2006 mit -0,558 deutlich größer als im Mai 2007 (-0,231). Des Weiteren wurde ein positiver Korrelationskoeffizient zwischen der Spross-TM und der Wurzellängendichte im Dezember 2006 (0,619) und im Mai 2007 (0,278) errechnet. Hingegen war die Korrelation zwischen der Wurzellängendichte und den Nmin-Werten im Dezember 2006 (-0,418) und Mai 2007 (-0,269) deutlich negativ.

#### *Zweites Versuchsjahr*

Die Merkmale Spross-TM und Nmin zeigten auch im zweiten Versuchsjahr zu den vier Beprobungsterminen eine negative Korrelation (Tabelle 27). Die Korrelation war im Dezember 2007 (-0,542) enger als im März 2008 (-0,405), April 2008 (-0,267) und Mai 2008 (-0,095). Ebenfalls recht hoch war der Korrelationskoeffizient zwischen der Spross-TM und der Wurzel-TM im Dezember 2007 (0,650) und auch im Mai 2008 (0,415). Die Korrelation von Wurzellängendichte und Nmin-Werten lag etwa auf dem Niveau des Vorjahres bei -0,476 (Dezember 2007) und -0,243 (Mai 2008).

### **3.5.2 Korrelationen bei Pflanzengruppen**

#### *Erstes Versuchsjahr*

Signifikante Korrelationen wurden zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten im Monat Dezember 2006 gefunden (Tabelle 28). Die Korrelationskoeffizienten für alle geprüften Varianten (-0,687) und für die Nicht-Leguminosen (-0,664) waren ähnlich. Im Vergleich dazu war der Korrelationskoeffizient zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten im Boden für die Leguminosen weniger eng aber dennoch signifikant (-0,596).

Tabelle 28: Korrelationen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten (0 cm bis 90 cm) im Dezember 2006 (Korrelation nach Pearson).

Varianten	r	n	p
Alle Varianten	-0,687	132	< 0,001
Nicht-Leguminosen	-0,664	84	< 0,001
Leguminosen	-0,596	24	< 0,01

#### *Zweites Versuchsjahr*

Die entsprechenden Korrelationen waren im zweiten Versuchsjahr weniger stark ausgeprägt als im ersten Versuchsjahr aber in jedem Fall auch signifikant (-0,448 bzw. -0,487).

Wiederum zeigte sich das Bild, dass für die Leguminosen der Korrelationskoeffizient zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten im Boden zwar signifikant aber weniger eng war (-0,404) als für die Nicht-Leguminosen.

Tabelle 29: Korrelationen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten (0 cm bis 90 cm) im Dezember 2007 (Korrelation nach Pearson).

	r	n	p
Alle Varianten	-0,448	131	< 0,001
Nicht-Leguminosen	-0,487	83	< 0,001
Leguminosen	-0,404	24	< 0,05

Die Überprüfung der Beziehungen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten zu späteren Messterminen zeigte für die Pflanzengruppen allgemein nur noch wenige signifikante Korrelationen.

### 3.6 Energiemais

#### *Erstes Versuchsjahr*

Im November 2007 wurde der höchste Mais-Ertrag von 164,5 dt TM ha<sup>-1</sup> erzielt, wenn der Energiemais der Schwarzbrache folgte (Tabelle 30). Der Mais nach Leguminosen erbrachte fast gleich viel Ertrag, so konnten nach dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen 160,3 dt TM ha<sup>-1</sup> geerntet werden. Wenn Rotklee vor Mais stand wurden 142,6 dt TM ha<sup>-1</sup> geerntet, alle anderen Leguminosen lagen zwischen diesen genannten Varianten. Hingegen erbrachte der Mais nach allen Nicht-Leguminosen-Varianten weniger Biomasse. Wenn Energiemais nach Kreuzblütlern stand lag der Ertrag des Maises zwischen 142,3 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterrübsen) und 125,5 dt TM ha<sup>-1</sup> (Markstammkohl). Die Erträge nach den verschiedenen Rapsorten unterschieden sich kaum; sie lagen zwischen 137,2 dt TM ha<sup>-1</sup> (Sorte „Oase“) und 129,3 dt TM ha<sup>-1</sup> (Sorte „Talent“). Bei Maisanbau nach den Wintergetreidevarianten waren die Maiserträge nach den Wintergerstensorten leicht höher als nach den Roggensorten oder nach Wintertriticale. Gering waren die Maiserträge wenn zuvor Futtergrasarten oder Spitzwegerich angebaut wurden. Mit 72,4 dt TM ha<sup>-1</sup> Mais wurde nach Deutschem Weidelgras der geringste Maisertrag erzielt.

#### *Zweites Versuchsjahr*

Der höchste Maisertrag im Jahr 2008 wurde nach der Vorkultur von Zottelwicken mit 146,7 dt TM ha<sup>-1</sup> erreicht. Wie Tabelle 31 zeigt, sorgte Schwarzbrache vor Mais für einen hohen Ertrag von 135,8 dt TM ha<sup>-1</sup>. Darauf folgten in der Rangliste der Vorfrüchte zunächst die Leguminosen Rotklee (134,7 dt TM ha<sup>-1</sup>), Inkarnatklee (125,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) und

Tabelle 30: TM-Erträge des Energiemaisses zum Erntetermin November 2007.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x</sub>	Homogene Gruppen
34 Schwarzbrache	164,5	12,8	a
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	160,3	18,3	a
24 Zottelwicken	158,0	12,8	a
22 Winterackerbohnen	153,1	7,6	a
27 Inkarnatklees	150,1	16,5	a b
23 Wintererbsen	148,8	5,3	a b
25 Gelber Steinklee	146,7	17,0	a b c
26 Rotklee	142,6	13,9	a b c d
18 Winterrübsen	142,3	15,0	a b c d
15 Winterraps "Oase"	137,2	4,8	a b c d
31 GEM Raps/Wegwarte	136,3	15,2	a b c d
14 Winterraps "Mikonos"	133,3	14,0	a b c d
12 Wintergerste "Mombasa"	133,1	21,1	a b c d
17 Winterraps "Becker"	129,9	13,4	a b c d
16 Winterraps "Talent"	129,3	15,6	a b c d
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	129,1	23,4	a b c d
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	126,1	5,8	a b c d
19 Markstammkohl	125,5	5,7	a b c d
11 Wintergerste "Reni"	124,9	15,1	a b c d
28 GEM Wicken/Roggen	121,7	8,5	a b c d
08 Winterroggen "Resonanz"	118,7	18,6	a b c d
07 Winterroggen "Carotrumpf"	118,4	20,5	a b c d
10 Wintergerste "Dorothea"	115,9	23,8	a b c d
20 Wegwarte	115,5	4,8	a b c d
09 Wintergerste "Ludmilla"	111,2	18,4	a b c d
33 Landsberger Gemenge	109,8	10,6	a b c d
06 Winterroggen "Recrut"	109,3	8,5	a b c d
13 Wintertriticale	107,9	19,7	a b c d
05 Winterroggen "Vitallo"	107,1	15,5	a b c d
04 Knaulgras	105,3	27,3	a b c d
02 Welsches Weidelgras	96,1	9,9	a b c d
03 Bastard-Weidelgras	79,9	10,8	b c d
21 Spitzwegerich	75,6	6,6	c d
01 Deutsches Weidelgras	72,4	7,8	d
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	71,3		

s<sub>x</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

Tabelle 31: TM-Erträge des Energiemaisses zum Erntetermin November 2008.

Variante	Trockenmasse [ dt TM ha <sup>-1</sup> ]	s <sub>x̄</sub>	Homogene Gruppen
24 Zottelwicken	146,7	6,1	a
34 Schwarzbrache	135,8	6,3	a b
26 Rotklee	134,7	5,0	a b
27 Inkarnatklee	125,6	9,3	a b c
28 GEM Wicken/Roggen	124,0	3,6	a b c d
23 Wintererbsen	123,8	5,7	a b c d
22 Winterackerbohnen	122,9	6,1	a b c d
25 Gelber Steinklee	119,2	2,6	b c d e
17 Winterraps "Becker"	113,2	7,2	b c d e f
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	108,6	3,6	c d e f g
14 Winterraps "Mikonos"	105,6	9,1	c d e f g h
16 Winterraps "Talent"	99,1	2,0	d e f g h i
18 Winterrübsen	98,4	3,3	d e f g h i
15 Winterraps "Oase"	96,7	4,0	e f g h i
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	94,8	1,6	e f g h i
19 Markstammkohl	93,7	3,0	e f g h i
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	91,5	4,3	f g h i
31 GEM Raps/Wegwarte	88,8	6,2	f g h i
12 Wintergerste "Mombasa"	87,6	3,8	f g h i j
07 Winterroggen "Carotrumpf"	87,2	4,3	f g h i j
13 Wintertriticale	86,3	3,9	g h i j k
11 Wintergerste "Reni"	85,7	3,0	g h i j k
06 Winterroggen "Recrut"	85,5	4,4	g h i j k
09 Wintergerste "Ludmilla"	85,0	2,3	g h i j k
08 Winterroggen "Resonanz"	83,5	3,8	g h i j k
10 Wintergerste "Dorothea"	82,3	2,5	h i j k
05 Winterroggen "Vitallo"	81,3	4,3	h i j k
04 Knautgras	75,6	1,3	i j k
33 Landsberger Gemenge	62,4	6,6	j k l
20 Wegwarte	60,5	0,8	k l
21 Spitzwegerich	45,9	2,2	l
02 Welsches Weidelgras	45,1	5,3	l
03 Bastard-Weidelgras	42,1	3,8	l
01 Deutsches Weidelgras	40,2	2,9	l
GD <sub>5%</sub> (Tukey-Test)	26		

s<sub>x̄</sub> : Standardfehler; Varianten mit gleichen Buchstaben in den Zeilen sind nicht signifikant verschieden, p < 0,05 (Tukey-Test).

das Gemenge aus Wicken und Roggen ( $124 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ). Schwächste Leguminosen-Variante war das Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen mit  $108,6 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Nur nach der Raps-Variante „Becker“ ( $113,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) lag der Maisertrag auf dem Niveau der Maiserträge nach Leguminosen, nach allen übrigen Nicht-Leguminosen-Varianten erzielte der Energiemais geringere Erträge. Wurde Mais nach den Brassica-Varianten angebaut, so wurden Erträge zwischen  $113,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$  und  $93,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$  (Markstammkohl) erzielt; damit waren die Maiserträge nach diesen Varianten recht einheitlich und lagen leicht unterhalb der Erträge nach dem Anbau von Leguminosen. Wiederum leicht schwächer waren die Maiserträge wenn Mais nach Wintergetreide angebaut wurde. Am geringsten war der Ertrag des Mais, wenn Weidelgras-Varianten ( $40,2 \text{ dt TM ha}^{-1}$  bis  $45,1 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), Spitzwegerich ( $45,9 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) oder Wegwarte als Vorkultur angebaut wurde. Auch nach Landsberger Gemenge ( $62,4 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ) blieb der Maisertrag vergleichsweise gering.

### **3.7 Abschätzung der Summe der Methanerträge aus Winterzwischenfrüchten und Energiemais**

#### *Erstes Versuchsjahr*

Die höchsten kombinierten Methan-Flächenerträge im Versuchsjahr 2006/2007 wurden geschätzt, wenn Energiemais nach Leguminosen angebaut wurde (Abbildung 23). Inkarnatklée ( $7374 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), das Gemenge Winterackerbohnen/Wintererbsen ( $7324 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) und Winterackerbohnen ( $7260 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) erbrachten in Kombination mit dem Energiemais die höchsten Methanerträge. Das Gemenge Triticale/Spitzwegerich plus Energiemais ( $7086 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) war ähnlich ertragreich. Die Winterroggen-Varianten lagen recht einheitlich in einem Bereich von  $6936 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Sorte „Carotrupf“) und  $6768 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Sorte „Resonanz“). Leicht schwächer als die Methanerträge nach den Getreidevarianten waren die Methanerträge wenn Mais nach Kreuzblütlern angebaut wurde; hier lagen die Methanerträge zwischen  $6433 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Markstammkohl) und  $5656 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Winterraps, Variante „Becker“). Bei den Weidelgras-Varianten erbrachten Deutsches Weidelgras ( $4619 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) und Bastard-Weidelgras ( $5217 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) in Kombination mit dem nachgebauten Energiemais weniger Methan als Energiemais wenn dieser nach Schwarzbrache ( $5281 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) stand. Ferner lagen das Welsche Weidelgras ( $5797 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) und Knaulgras ( $5536 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) auf etwa diesem Niveau. Die beiden Kräuter-Varianten Wegwarte ( $5107 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) und Spitzwegerich ( $4124 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) erzielten in Kombination mit dem Energiemais ebenfalls weniger Methanertrag als Energiemais nach Schwarzbrache.

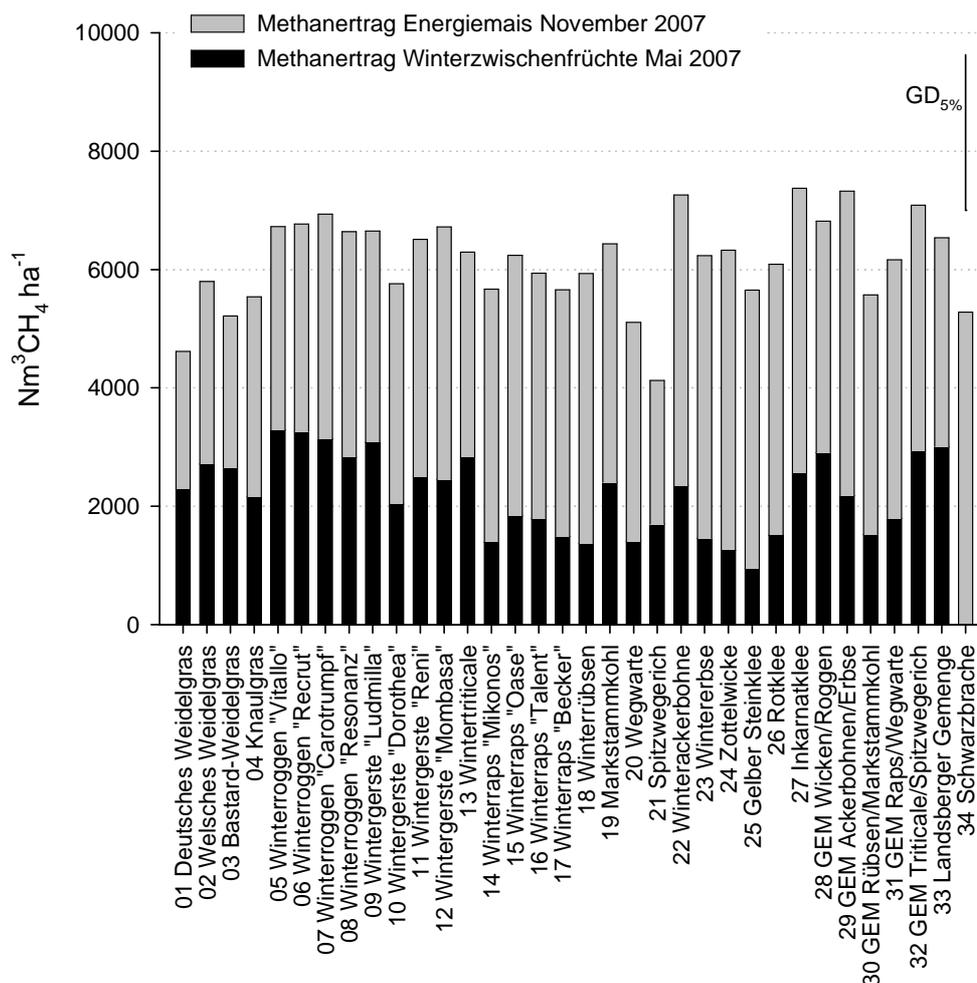


Abbildung 23: Geschätzter Methanertrag der Winterzwischenfrüchte und des nachgebauten Energiemais im Versuchsjahr 2006/2007. Die dargestellten Methanerträge der Winterzwischenfrüchte wurden aus den TM-Erträgen im Mai 2007 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet. Die Methanerträge des Energiemais wurden aus den TM-Erträgen des Energiemais im November 2007 und einer angenommenen, pauschalen spezifischen Methanausbeute von  $0,321 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  (Döhler et al. 2009) errechnet. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule,  $\text{GD}_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $2630 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

### Zweites Versuchsjahr

Die höchsten Methanerträge aus der Kombination von Winterzwischenfrüchten mit Energiemais wurde bei Rotklee ( $6517 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), Inkarnatklee ( $6395 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), dem Gemenge aus Wicken und Roggen ( $6215 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), und Zottelwicken ( $5998 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) geschätzt (Abbildung 24). Einen geringeren Methanertrag (statistisch nicht signifikant) erbrachte der Anbau von Mais nach Kreuzblütlern; hier wurden  $5115 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Winterrübsen) bis  $4316 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Winterraps „Mikonos“) geschätzt. Die Getreide-Varianten lagen mit Methanerträgen von  $4023 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) bis  $3364 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Wintergerste, Sorte „Dorothea“) unterhalb des

Methanertrages des Energiemaises, wenn er nach Schwarzbrache ( $4358 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) angebaut wurde. Tendenziell geringere Methanerträge als die Kombination von Wintergetreide mit Mais erbrachten die Weidelgras-Varianten und Knaulgras sowie die Kräuter-Varianten. Bei Wegwarte ( $2908 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ), Deutschem Weidelgras ( $2516 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) und Spitzwegerich ( $2464 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) war der Methanertrag aus Winterzwischenfrucht und Energiemais signifikant geringer als bei der Variante, bei der keine Winterzwischenfrucht angebaut wurde (Schwarzbrache).

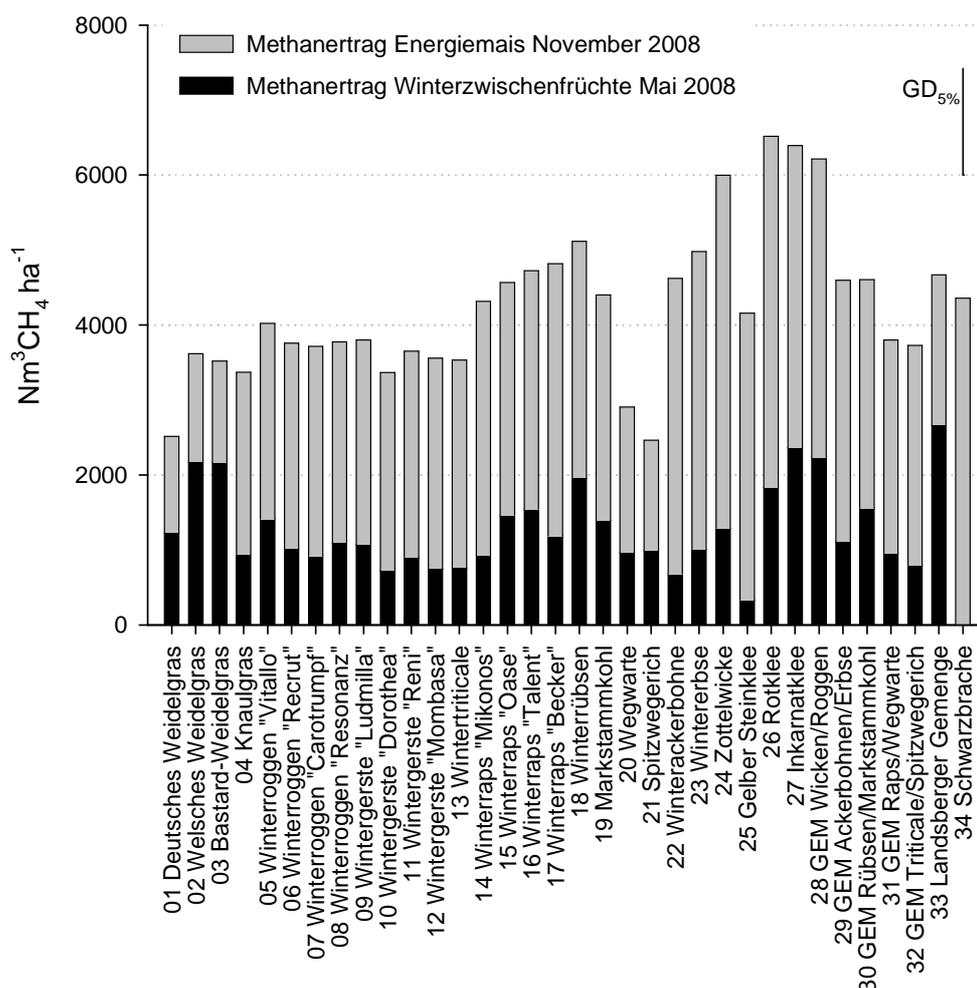


Abbildung 24: Geschätzter Methanertrag der Winterzwischenfrüchte und des nachgebauten Energiemaises im Versuchsjahr 2007/2008. Die dargestellten Methanerträge der Winterzwischenfrüchte wurden aus den TM-Erträgen im Mai 2008 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet. Die Methanerträge des Energiemaises wurden aus den TM-Erträgen des Energiemaises im November 2008 und einer angenommenen, pauschalen spezifischen Methanausbeute von  $0,321 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  (Döhler et al. 2009) errechnet. Die angegebene Grenzdifferenz bezieht sich auf die Höhe der Gesamtsäule,  $\text{GD}_{5\%}$  (Tukey-Test) =  $1419 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

## 3.8 Indexberechnungen

### 3.8.1 Nmin-Index

*Erstes Versuchsjahr*

Die Berechnung der Index-Werte aus den Nmin-Daten ( $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ ) des Dezembers 2006 ergaben deutliche Unterschiede zwischen den Pflanzengruppen (Abbildung 25). Die höchsten Werte (0,70 bis 0,66) wurden für die Kreuzblütler errechnet. Die  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ -Werte aller acht Varianten, die entweder Kreuzblütler in Reinsaat waren oder aus Gemenge mit Kreuzblütlern bestanden, lagen höher als die Werte der übrigen Prüfglieder. Recht hohe

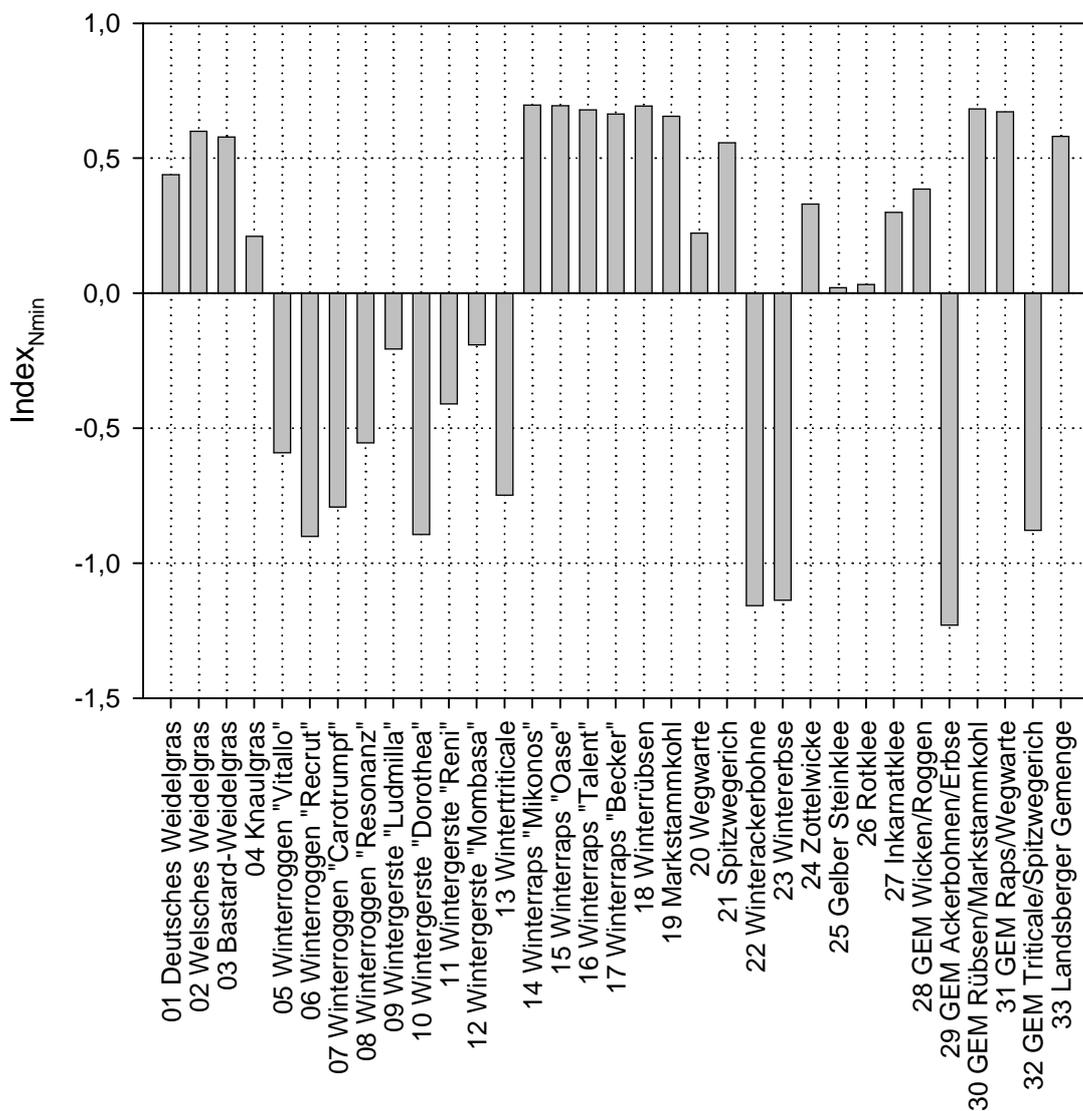


Abbildung 25: Charakterisierung der Nmin-Absenkung im Boden mit Hilfe des  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  zum Zeitpunkt Dezember 2006.

Index<sub>Nmin</sub>-Werte zeigten außerdem Welsches Weidelgras (0,60), Landsberger Gemenge (0,58), Bastard-Weidelgras (0,58) und Spitzwegerich (0,56). Unter den Leguminosen zeigten Zottelwicken (0,33) und Inkarnatklee die höchsten Werte, während die Wintererb-  
sen (-1,14) und die Winterackerbohnen (-1,16) und das Gemenge dieser Arten (-1,23) die geringsten Index<sub>Nmin</sub>-Werte erreichten. Ebenfalls negative Index<sub>Nmin</sub>-Werte zeigten alle Getreide-Varianten sowie das Gemenge Triticale/Spitzwegerich. Die Werte lagen hier in einem Bereich von -0,19 (Wintergerste, Sorte „Mombasa“) bis -0,90 (Winterroggen, Sorte „Recrut“).

### Zweites Versuchsjahr

Der höchste Index<sub>Nmin</sub>-Wert im Dezember 2007 wurde bei Bastard-Weidelgras (0,80), Welschem Weidelgras (0,66) und Landsberger Gemenge (0,64) ermittelt (Abbildung 26). Etwa gleich hohe Index<sub>Nmin</sub>-Werte zeigten Winterraps (Sorte „Oase“, 0,61), das Gemenge

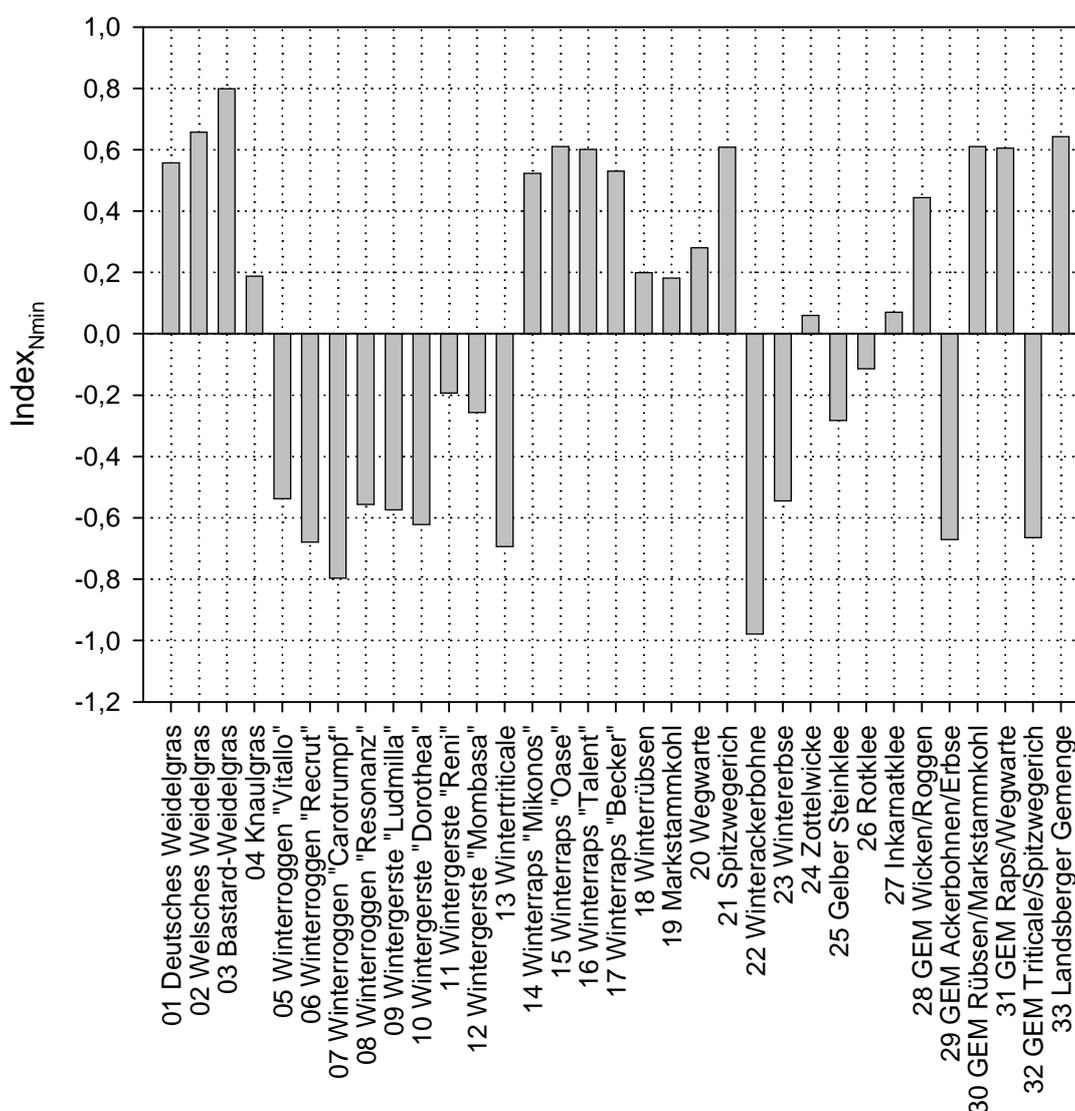


Abbildung 26: Charakterisierung der Nmin-Absenkung im Boden mit Hilfe des Index<sub>Nmin</sub> zum Zeitpunkt Dezember 2007.

aus Rübsen und Markstammkohl (0,61), Spitzwegerich (0,61) und das Gemenge aus Raps und Wegwarte (0,61). Deutlich geringer waren die Werte von Winterrübsen (0,20) und Markstammkohl (0,18); diese lagen auf dem Niveau des Knaulgrases (0,19). Geringe Werte erzielten die Getreide-Varianten und das Gemenge Triticale/Spitzwegerich, die mit -0,19 (Wintergerste, Sorte „Reni“) bis -0,80 (Winterroggen, Sorte „Carotrumpf“) alle im negativen Werte-Bereich lagen. Unter den Leguminosen zeigten Inkarnatklee (0,07) und Zottelwicken (0,06) die höchsten  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ -Werte, die übrigen Leguminosen lagen mit -0,11 (Rotklee) bis -0,98 (Winterackerbohnen) deutlich darunter.

### 3.8.2 Winterzwischenfrucht-Index

Erstes Versuchsjahr

Mit den Index-Werten 0,49 (Winterroggen, Sorte „Vitallo“), 0,47 (Winterroggen, Sorte „Recrut“), 0,42 (Winterroggen, Sorte „Carotrumpf“) und 0,39 (Wintergerste, Sorte „Ludmilla“)

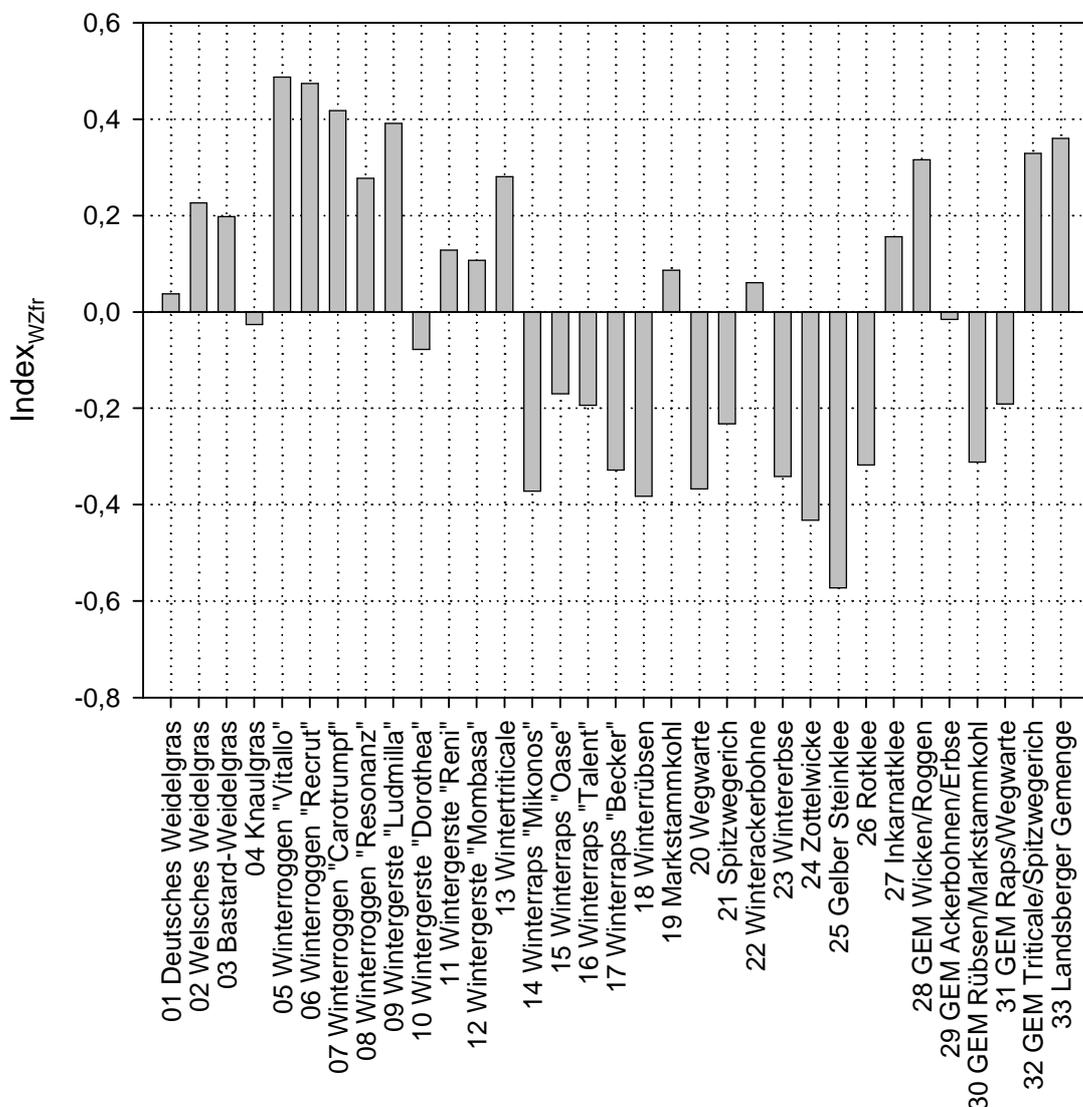


Abbildung 27: Charakterisierung der Methanbildung (Methan-Flächenerträge) der Winterzwischenfrüchte mit Hilfe des  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  zum Zeitpunkt Mai 2007.

zeigten vier Wintergetreide-Varianten die höchsten  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ -Werte im ersten Versuchsjahr (Abbildung 27). Es folgten die drei Gemenge-Varianten Landsberger Gemenge (0,36), Triticale/Spitzwegerich (0,33) und das Gemenge aus Wicken und Roggen (0,32). Geringe Werte wurden für die Kreuzblütler ermittelt, die mit Ausnahme von Markstammkohl (0,09) im Bereich von -0,17 (Winterraps, Sorte „Oase“) bis -0,38 (Winterrüben) lagen. Unter den Leguminosen erzielten Inkarnatklee (0,16) und Winterackerbohnen (0,06) die höchsten Werte; die geringsten  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ -Werte erzielten Zottelwicken (-0,43) und Gelber Steinklee (-0,57).

### Zweites Versuchsjahr

Landsberger Gemenge (1,10) erzielte im zweiten Versuchsjahr den höchsten  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ -Wert (Abbildung 28). Dieser Variante folgten Inkarnatklee (0,84), Wickroggen (0,74), Wel-

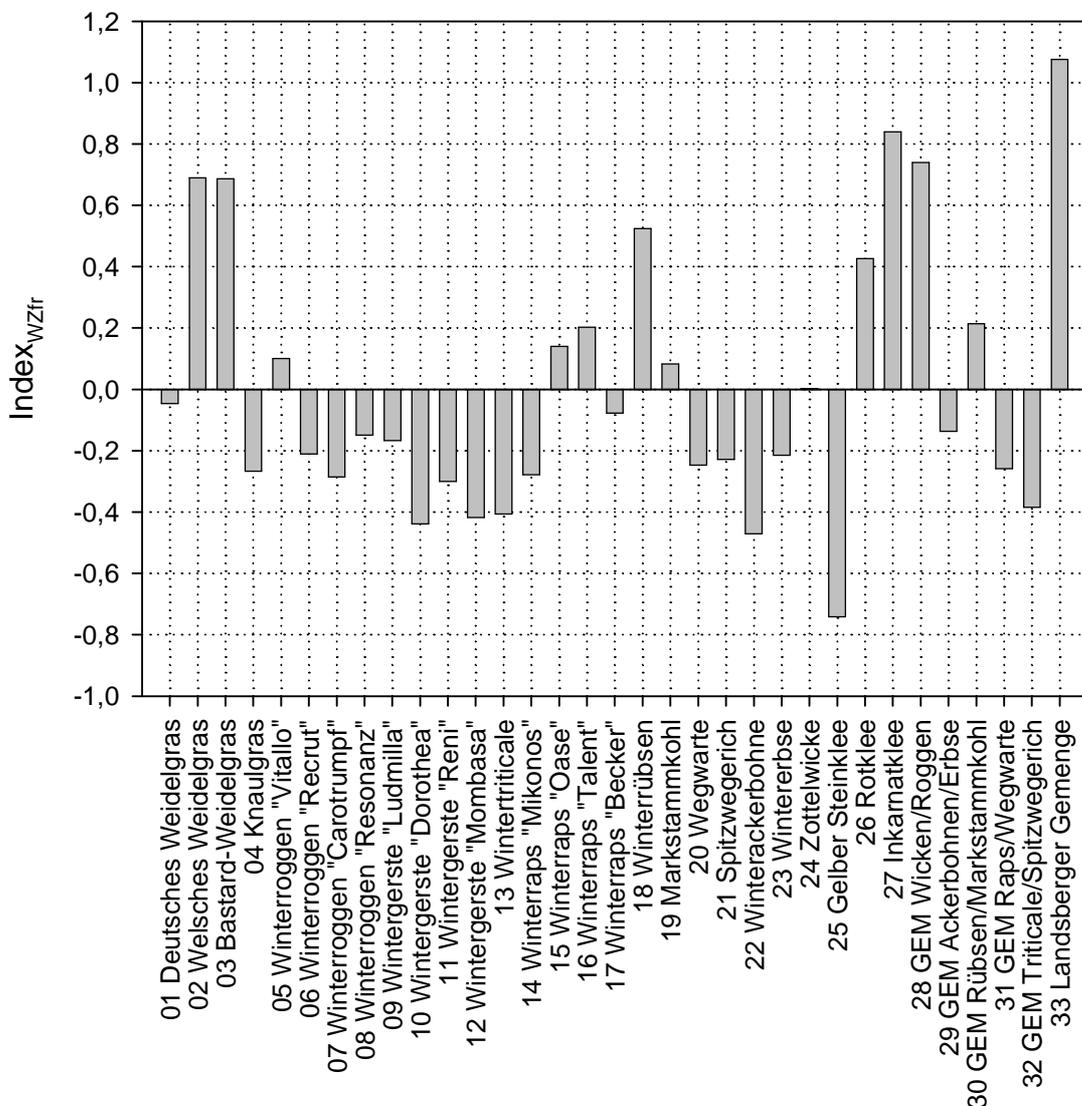


Abbildung 28: Charakterisierung der Methanbildung (Methan-Flächenerträge) der Winterzwischenfrüchte mit Hilfe des  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  zum Zeitpunkt Mai 2008.

ches Weidelgras (0,69) und Bastard-Weidelgras (0,69). Die weiteren geprüften Futtergrasarten Deutsches Weidelgras (-0,05) und Knautgras (-0,28) zeigten deutlich geringere Werte. Ebenfalls recht inhomogen waren die  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ -Werte der Kreuzblüter, die von 0,52 (Winterrüben) bis -0,28 (Winterraps, Sorte „Mikonos“) reichten. Geringe  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$ -Werte wurden für die Getreide-Variaten ermittelt. Stärkste Variante war hier Winterroggen (Sorte „Vitallo“, 0,10), schwächste Variante war Wintergerste (Sorte „Dorothea“, -0,44). Die geringsten Werte an diesem Termin zeigten Winterackerbohnen (-0,47) und Gelber Steinklee (-0,74).

### 3.8.3 Energiemais-Index

Erstes Versuchsjahr

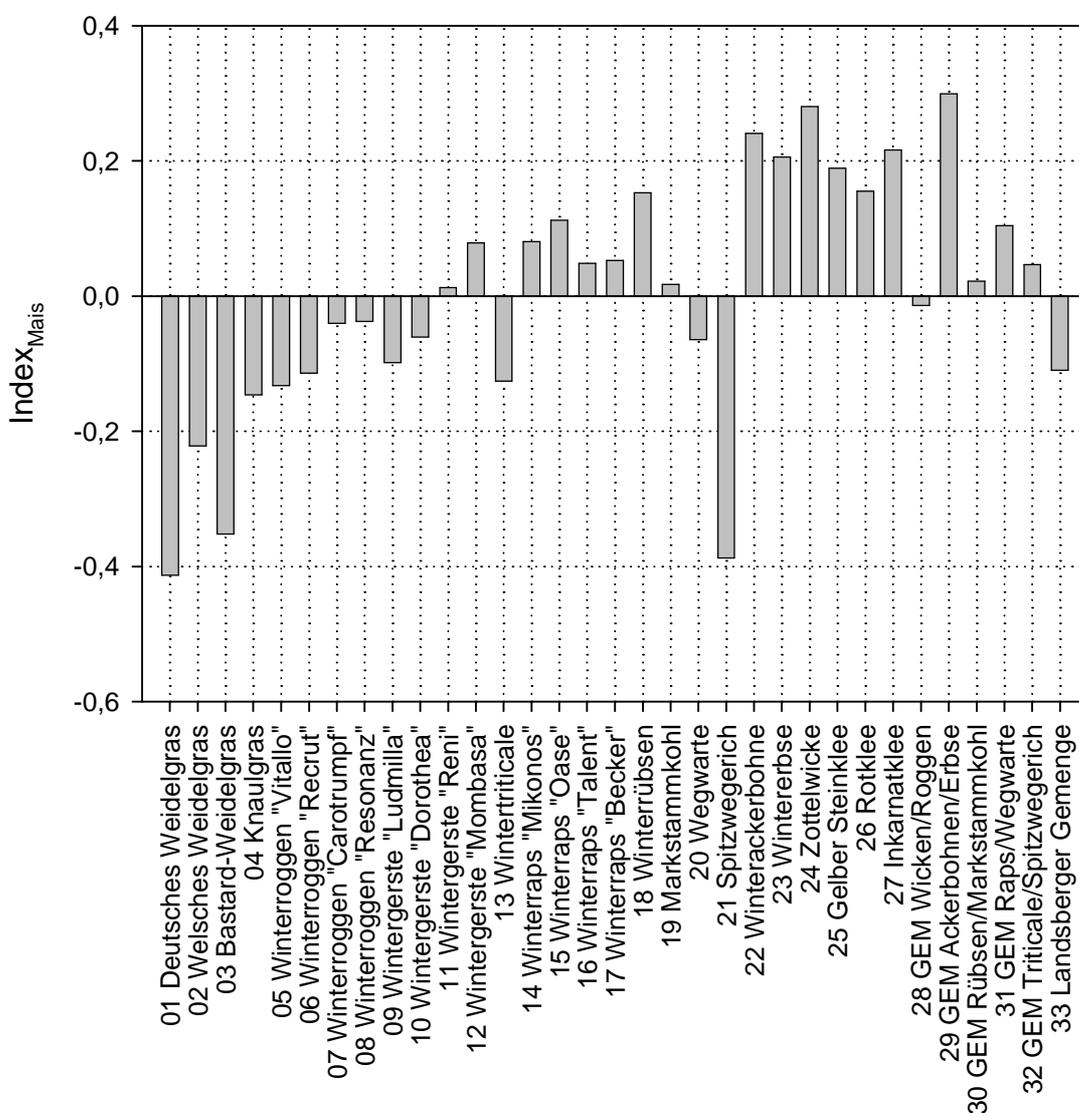


Abbildung 29: Charakterisierung des Maisertrages in Abhängigkeit von den Winterzwischenfrüchten mit Hilfe des  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  zum Zeitpunkt November 2007.

Das Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (0,30) sowie sämtliche Leguminosen in Reinsaat erzielten im ersten Versuchsjahr die höchsten Werte des Energiemais Indexes ( $\text{Index}_{\text{Mais}}$ ; Abbildung 29). Die Zottelwicken (0,28), Winterackerbohnen (0,24), Inkarnatklee (0,22), Wintererbsen (0,21), Gelber Steinklee (0,19) und Rotklee (0,16) zeigten größere  $\text{Index}_{\text{Mais}}$ -Werte als die Kreuzblütler, welche Werte von 0,15 (Winterrüben) bis 0,02 (Markstammkohl) aufwiesen. Besonders geringe  $\text{Index}_{\text{Mais}}$ -Werte zeigten Deutsches Weidelgras (-0,41), Spitzwegerich (-0,39), Bastard-Weidelgras (-0,35) und Welsches Weidelgras (-0,22). Auch die Werte der Getreide-Varianten lagen überwiegend im negativen Bereich; so zeigten zwei Wintergerstensorten (Sorte „Mombasa“, -0,08 und Sorte „Reni“, -0,01) die höchsten Index-Werte. Die geringsten Werte dieser Pflanzengruppe wurden bei Winterroggen (Sorte „Vitallo“, -0,13) und Triticale (-0,13) ermittelt.

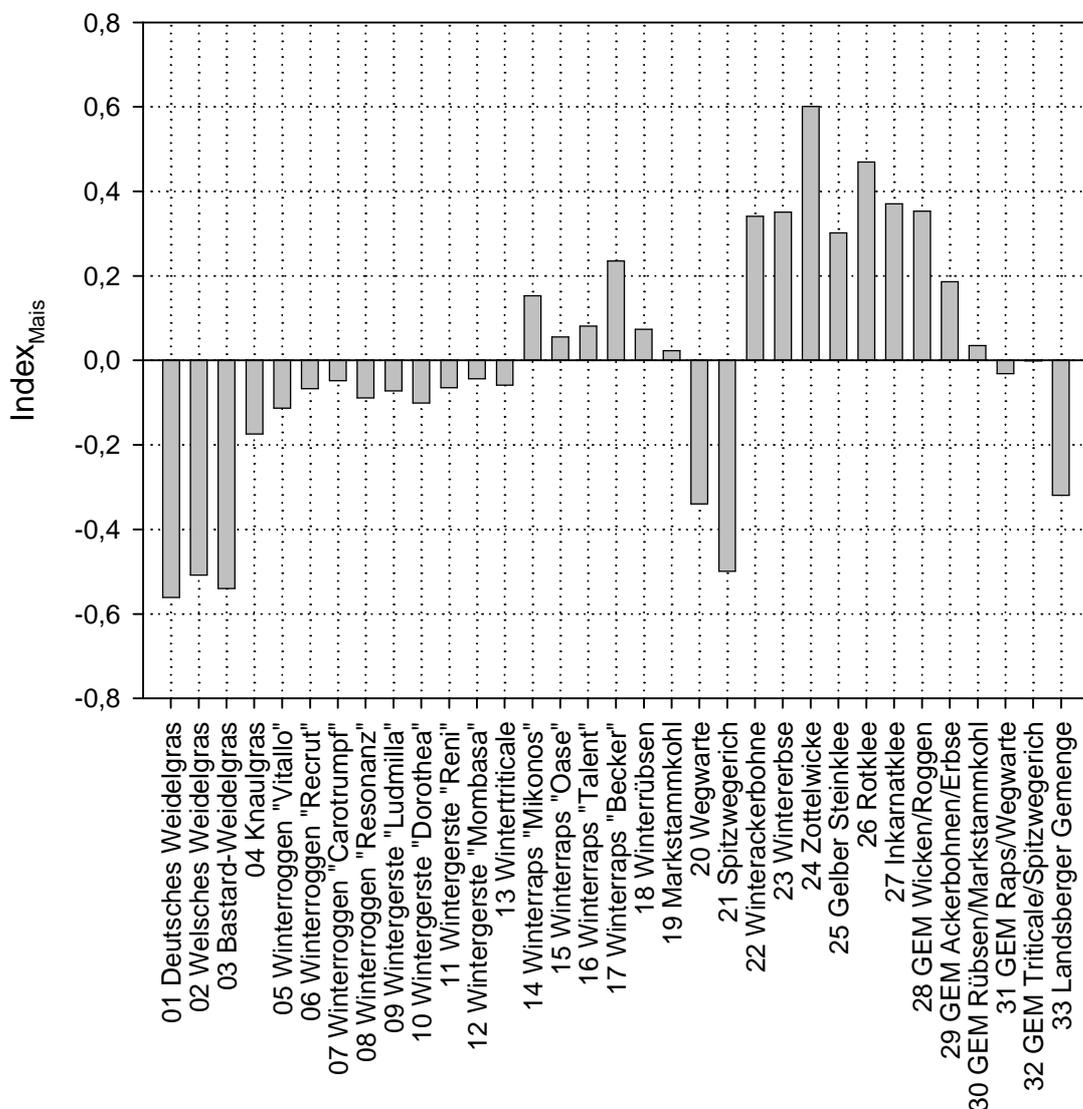


Abbildung 30: Charakterisierung des Maisertrages in Abhängigkeit von den Winterzwischenfrüchten mit Hilfe des  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  zum Zeitpunkt November 2008.

---

*Zweites Versuchsjahr*

Die Energiemais-Index-Werte des zweiten Versuchsjahres lagen bei der Gruppe der Leguminosen am höchsten (Abbildung 30). Höchste Index-Werte wurden von den Zottelwicken (0,60), Rotklee (0,47) und Inkarnatklee (0,37) erreicht. Es folgte das Gemenge aus Wicken und Roggen (0,35), Wintererbsen (0,35), Winterackerbohnen (0,34) und Gelber Steinklee (0,30). Werte zwischen 0,24 (Winterraps, Variante „Becker“) und 0,02 (Markstammkohl) wurden bei den Kreuzblütlern ermittelt. Geringer waren die  $\text{Index}_{\text{Mais}}$ -Werte der Getreide-Varianten die zwischen -0,04 (Wintergerste, Sorte „Mombasa“) und -0,11 (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) lagen. Die geringsten  $\text{Index}_{\text{Mais}}$ -Werte wurden bei den drei Weidelgras-Varianten mit -0,51 (Welsches Weidelgras), -0,54 (Bastard-Weidelgras) und -0,56 (Deutsches Weidelgras) errechnet.

### 3.8.4 Gesamtindex $I_{\text{RA}}$

*Erstes Versuchsjahr*

Einen hohen Gesamtindex ( $I_{\text{RA}}$ ) im ersten Versuchsjahr erreichten Landsberger Gemenge (0,83), Markstammkohl (0,76), das Gemenge aus Wicken und Roggen (0,69) und Inkarnatklee (0,67; Abbildung 31). Mit Werten von 0,63 bis 0,39 erreichten auch alle Winterraps-Varianten und Winterrüben hohe  $I_{\text{RA}}$ -Werte. Die Futtergras-Varianten zeigten sich weniger homogen, Welsches Weidelgras lag mit dem Gesamtindex  $I_{\text{RA}}$  von 0,60 deutlich vor Bastard-Weidelgras (0,42). Nochmals deutlich geringer waren die Werte für Deutsches Weidelgras (0,06) und Knaulgras (0,04). Die Getreide-Varianten lagen auf einem geringeren Niveau als die Futtergrasarten; sie erreichten Werte von <0,01 (Wintergerste, Sorte „Mombasa“) bis -1,03 (Wintergerste, Sorte „Dorothea“). Geringe Index-Werte wurden auch für Winterackerbohnen (-0,86), dem Gemenge aus Winterackerbohnen und Wintererbsen (-0,95) sowie für Wintererbsen (-1,27) ermittelt.

*Zweites Versuchsjahr*

Im zweiten Versuchsjahr erzielten zwei Gemenge-Varianten die höchsten Index-Werte (Abbildung 32). Das Gemenge aus Wicken und Roggen lag mit einem  $I_{\text{RA}}$ -Wert von 1,54 vor dem Landsberger Gemenge (1,40) und vor Inkarnatklee (1,28). Mit deutlichem Abstand folgten Bastard-Weidelgras (0,95), Winterraps (Sorte „Talent“, 0,88), das Gemenge Rüben/Markstammkohl (0,86) und Welsches Weidelgras (0,84). Bei den Leguminosen lagen die  $I_{\text{RA}}$ -Werte von Rotklee (0,78) und Zottelwicken (0,66) deutlich höher als Wintererbsen (-0,41) und Gelber Steinklee (-0,72). Der  $I_{\text{RA}}$ -Wert von Winterackerbohnen lag im zweiten Versuchsjahr mit -1,11 deutlich unterhalb der Werte der übrigen Leguminosen und nur drei Varianten hatten geringere  $I_{\text{RA}}$ -Werte. Auch die Getreide-Varianten lagen mit

Werten von -0,55 (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) bis -1,16 (Wintergerste, Sorte „Dorothea“), auf einem sehr geringen Niveau.

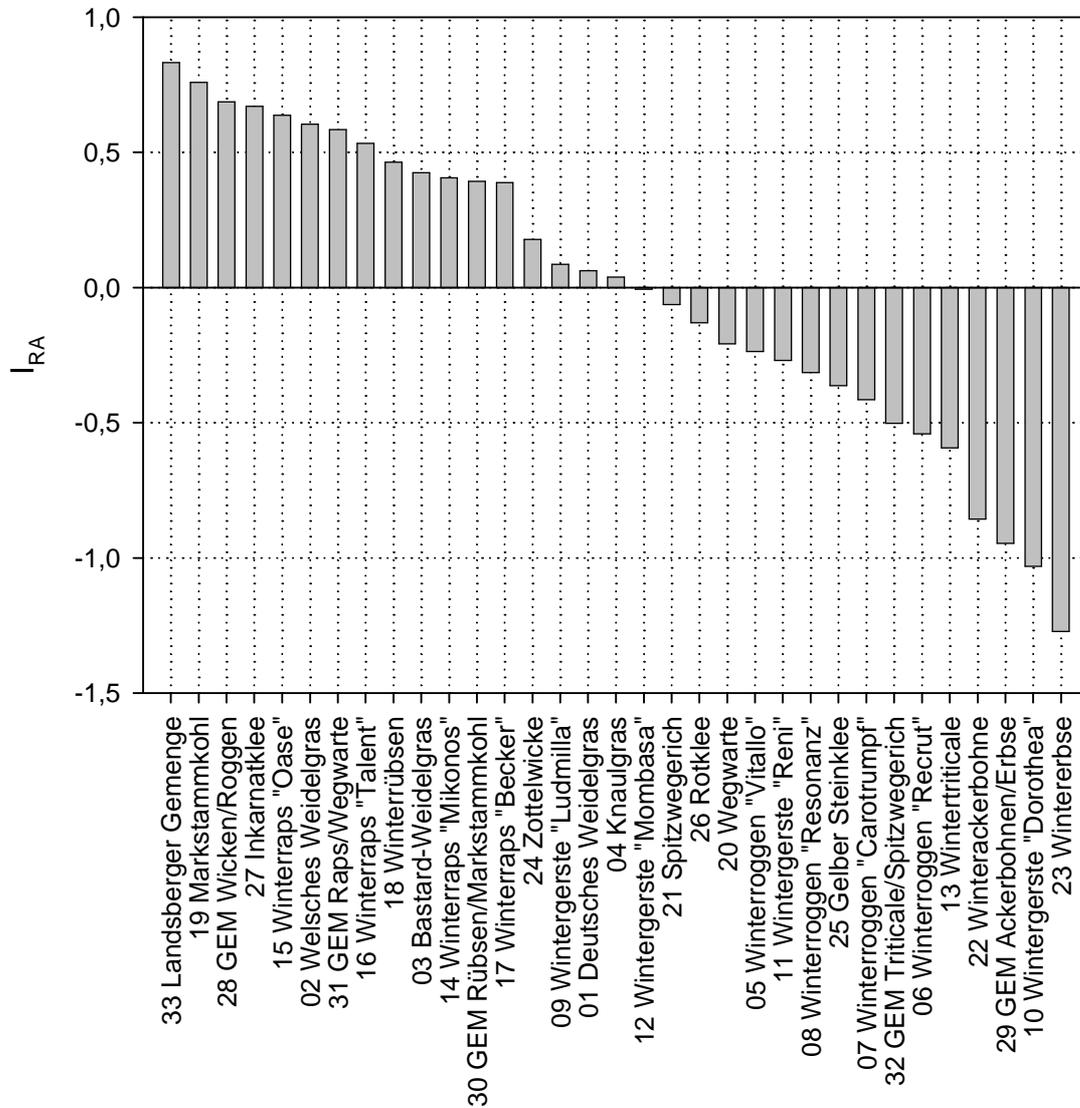


Abbildung 31: Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  für die Winterzwischenfrüchte des ersten Versuchsjahres 2006/2007.

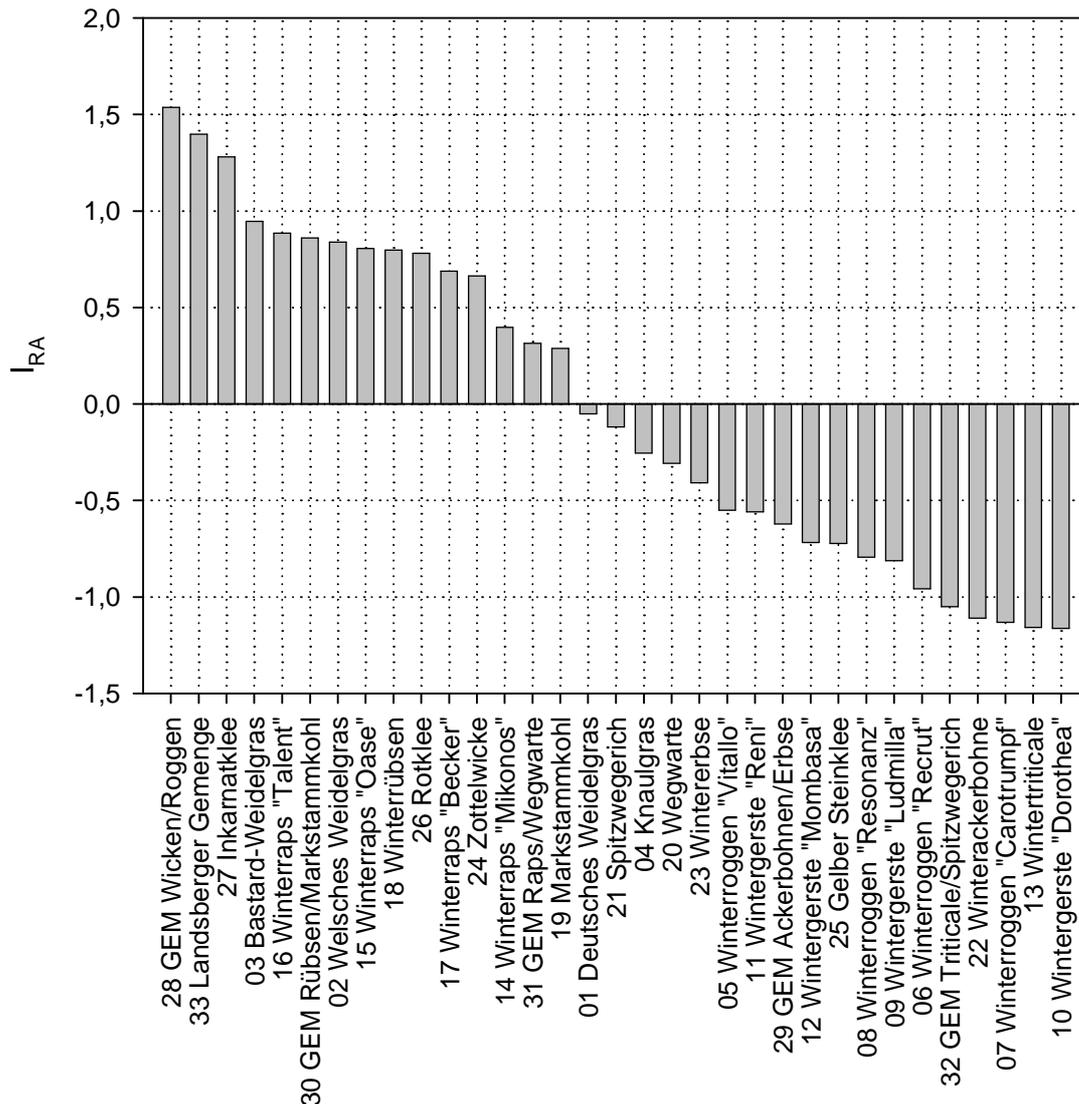


Abbildung 32: Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  für die Winterzwischenfrüchte des zweiten Versuchsjahres 2007/2008.

### 3.8.5 Mittelwert des Gesamtindex $I_{RA}$ über beide Versuchsjahre

Das Mittel aus den Indizes der relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  der Winterzwischenfrüchte aus den Versuchsjahren 2006/07 und 2007/08 zeigte die höchsten Werte für zwei Gemenge-Varianten (Abbildung 33). Das Landsberger Gemenge (1,11) und das Gemenge aus Wicken und Roggen (1,11) konnten den höchsten mittleren Gesamtindex  $I_{RA}$  aller Varianten erreichen. Ebenfalls einen hohen mittleren Gesamtindex  $I_{RA}$  erzielte Inkarnatklée (0,98). Positive Werte erzielten des Weiteren die Kreuzblütler sowie die Weidelgras-Varianten Welsches Weidelgras und Bastard-Weidelgras. Hingegen war das

Deutsche Weidelgras bei allen drei Teilindizes schwächer als die anderen Weidelgras-Varianten und erreichte als mittleren Gesamtindex  $I_{RA}$  nur den Wert 0,01. Die Werte der Kräuter sowie aller Getreide-Varianten lagen im negativen Bereich. Schwächste Variante war Wintergerste der Sorte „Dorothea“ (-1,10). Auch die großkörnigen Leguminosen in Reinsaat sowie deren Gemenge erzielten negative Werte beim Mittelwert des Gesamtindex  $I_{RA}$ .

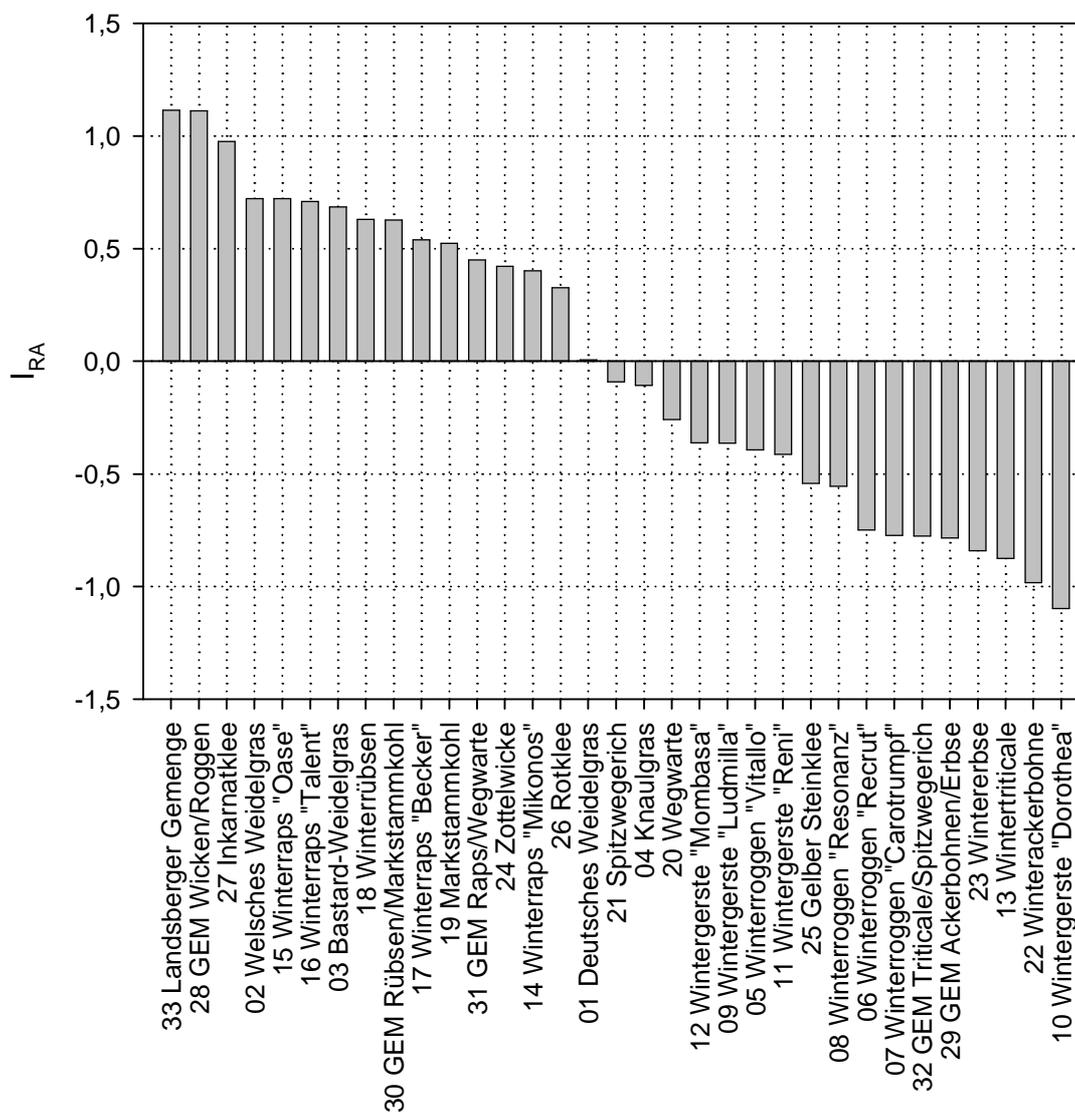


Abbildung 33: Mittlerer Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  für die Winterzwischenfrüchte. Mittelwerte aus den zwei Versuchsjahren 2006/2007 und 2007/2008.

---

## 4 Diskussion

### 4.1 Sprosswachstum

#### 4.1.1 Sprossmasse

In der praktischen Landwirtschaft ist es von großer Bedeutung, dass die Bergung der Sprossmasse durch den Einsatz landtechnischer Maschinen realisiert werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Ernte der Biomasse mit zunehmendem Lagern der Bestände schwieriger und verlustreicher wird. Dieses wurde im vorgestellten Versuch nicht berücksichtigt; auch lagernde Bestände wurden weitestgehend vollständig beerntet. Außerdem erfolgte im Feldversuch eine Beerntung durch bodennahes Abschneiden, welches in der landwirtschaftlichen Praxis in dieser Tiefe nicht möglich wäre. Im Vergleich zur landwirtschaftlichen Praxis werden daher vermutlich die Spross-Erträge aufgrund der manuellen Erntevorgänge im vorgestellten Feldversuch leicht überschätzt.

Die geprüften Pflanzengruppen zeigten bei den Dezember-Beprobungen in beiden Versuchsjahren die gleiche Rangfolge bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit im Aufbau von Biomasse. Hohe Erträge im Dezember erzielten die Futtergras-Varianten und Kreuzblütler, gefolgt von den Kräutern, Leguminosen und den Getreide-Varianten. Es zeigte sich also eine Überlegenheit der beiden häufig als Futterpflanzen verwendeten Pflanzengruppen. Diese werden in erster Linie mit dem Ziel angebaut, hohe Sprossmasseerträge für die Nutzung als Grundfutter in der Tierernährung bereitzustellen und wurden in dieser Richtung züchterisch bearbeitet. Zu einer Pflanzenart dieser Hauptnutzungsrichtung ist auch Inkarnatklee zu zählen, der ebenfalls im Dezember zu den ertragreichen Prüfgliedern zählte. Neben der Produktion hoher Sprossmasseerträge sollen die Futterpflanzen auch eine gute Verdaulichkeit mit entsprechend niedrigen Ligningehalten zeigen. Ligninarmut ist auch ein Merkmal, welches in Biogasanlage eine Bedeutung hat. Die gewünschten geringen Ligningehalte von Welschem Weidelgras und Inkarnatklee auch mit zunehmender physiologischer Entwicklung, konnten durch die Analyse im hier vorgestellten Versuch bestätigt werden (Tabelle 21).

Erstaunlich gut hat der Spitzwegerich im Dezember beider Jahre abgeschnitten. Mit Erträgen von 20,7 dt TM ha<sup>-1</sup> (2006) bzw. 17,4 dt TM ha<sup>-1</sup> (2007) lag diese Pflanzenart im ersten Versuchsjahr nur wenig hinter den Weidelgras-Varianten. Auch bei der Entwicklung im Frühjahr konnte Spitzwegerich gute Ergebnisse erzielen; der Ertrag von 73 dt TM ha<sup>-1</sup>

entsprach dem Niveau des Knautgrases und des Deutschen Weidelgrases. Diese Erträge deuten an, dass diese züchterisch nur wenig bearbeitete Pflanzenart unter den Umweltbedingungen des Herbstes und milden Winters vielen Kulturpflanzen überlegen ist. Spitzwegerich ist eine Grasland-Pflanze, die laut Stulen et al. (1981) an relativ nährstoffarme Standorte angepasst ist. Es wird berichtet, dass Spitzwegerich in der Lage ist, sich sehr schnell auf eine wechselnde Nitratversorgung einzustellen. Diese Voraussetzungen waren auch im hier vorgestellten Versuch, mit hohen Stickstoffausgangswerten im Herbst und geringer Stickstoffversorgung im Winter gegeben, und kamen der Entwicklung dieser Pflanzenart entgegen.

Besonders geringe Erträge zu allen Ernteterminen erbrachte der Gelbe Steinklee. Obwohl Gelber Steinklee als anspruchslose Pflanze gilt, die lediglich auf sauren Böden schlecht gedeiht (Geisler 1980), waren die Erträge von 37,6 dt TM ha<sup>-1</sup> (Mai 2007) 13,2 dt TM ha<sup>-1</sup> (Mai 2008) die jeweils geringsten aller geprüften Varianten. Möglicherweise hat die Aussaat im Herbst die Entwicklung aufgrund zu geringer Einstrahlung behindert. Geisler (1980) erwähnt eine langsame Jugendentwicklung von Steinklee unter einer Deckfrucht, da auch dort die Lichtansprüche des Steinklees nicht erfüllt werden.

Neben physiologischen Besonderheiten der geprüften Arten bezüglich der Jugendentwicklung, war im vorgestellten Versuch der unterschiedliche Aussaattermin der bestimmende Faktor für die akkumulierte Sprossmasse im Dezember. So standen den früh gesäten Varianten 109 Tage (erstes Versuchsjahr) bzw. 121 Tage (zweites Versuchsjahr) bis zur Dezember-Ernte zur Verfügung, hingegen konnten die spät gesäten Varianten lediglich 70 Tage (erstes Versuchsjahr) bzw. 56 Tage (zweites Versuchsjahr) zum Bestandaufbau nutzen. Zudem muss berücksichtigt werden, dass sich während dieser herbstlichen Jahreszeit, die durch abnehmende Tageslängen mit entsprechend geringerer Einstrahlung gekennzeichnet ist, die Sprossmassebildung verlangsamt.

Auch Lütke Entrup (2001) begründet die abnehmende Leistungsfähigkeit durch späte Aussaat der Zwischenfrüchte im Herbst mit verminderten Wachstumsraten. Vos & van der Putten (1997) fanden 258 g TM m<sup>-2</sup> bei Aussaat einer Zwischenfrucht Ende August, und lediglich 28 g TM m<sup>-2</sup> wenn die Aussaat Ende September erfolgt war; Erntetermin war hier Anfang Dezember. Sie berichten weiterhin, dass die Einstrahlung maßgeblich das herbstliche Wachstum der Winterzwischenfrüchte bestimmt. Gleichfalls geringere Erntemengen von 15% bis 59% bei Winterroggen und anderen Zwischenfrüchten durch verspätete Aussaat um einen Monat stellten Odhiambo & Bomke (2001) fest. Elers & Hartmann (1987) verglichen die Erträge von Winterzwischenfrüchten zu fünf Aussaatterminen von Mitte August bis Mitte Oktober und ermittelten Grünmasseerträge, die von etwa 400 dt FM ha<sup>-1</sup> bei früher Aussaat, bis unter 20 dt FM ha<sup>-1</sup> bei später Aussaat im Oktober reichten. Einen unzureichendem Begrünungsaufwuchs bei Aussaat der Zwischenfrüchte im Oktober bestätigen Bodner et al. (2001). Auch Francis et al. (1998) und Gselman & Kramberger (2008) fanden heraus, dass späte Aussaat der Winterzwischenfrüchte zu deutlich geringeren Erträgen im Frühling führte.

---

Folglich sollte die Interpretation der Sprossmasse-Daten des zweiten Versuchsjahres im hier vorgestellten Versuch stets unter Berücksichtigung der Aussaatverspätung und damit einhergehenden Ertragsminderungen erfolgen.

Während der Wintermonate konnten die Pflanzenbestände (außer Wegwarte, Gelber Steinklee und das Gemenge aus Rübsen und Markstammkohl) in beiden Versuchsjahren weitere Biomasse akkumulieren, besonders leistungsstark waren hier erneut der Inkarnatklee und im Jahr 2007 auch die Getreide-Varianten, während die Weidelgras-Varianten und die Kreuzblütler in den Wintermonaten nur verhalten wuchsen. Unterschiedliche Wärmebedürfnisse der Pflanzenarten und Anpassungen an verschiedenen Witterungsbedingungen wurden hier sichtbar. Die hohen Zuwachsraten in den Wintermonaten stellen sicherlich eine Besonderheit dar, die nur aufgrund der überaus milden Temperaturen möglich waren. Ein starkes Frostereignis in dieser Zeit hätte den aktiven Pflanzenarten vermutlich stärkere Schäden zugefügt als den „defensiveren“ Kreuzblütlern und Futtergrasarten. Eine Prüfung auf Winterfestigkeit der Varianten ist ein Aspekt, der in weiteren Versuchen betrachtet werden muss.

Zum letzten Erntetermin im Mai zeigte sich in beiden Versuchsjahren bezüglich der produzierten Biomasse die besondere Leistungsfähigkeit des Inkarnatklees und der Weidelgras-Varianten. Im ersten Versuchsjahr waren außerdem die Erträge der Getreide-Varianten, und hier besonders die Winterroggensorten unter den ertragsstärksten Varianten. Dieses Ertragsniveau wurde von den Getreide-Varianten im Mai des zweiten Versuchsjahres nicht erreicht, die Ursache hierfür dürfte in der genannten witterungsbedingt verspäteten Aussaat der Getreide-Varianten im Herbst 2007 liegen.

Die hohen Spross-Erträge des Inkarnatklees von  $107 \text{ dt TM ha}^{-1}$  (erstes Versuchsjahr) bzw.  $99 \text{ dt TM ha}^{-1}$  (zweites Versuchsjahr) sind außergewöhnlich für diese Pflanzenart; in der Literatur werden stets geringere Werte genannt. Haas (2003) nennt Erträge von etwa  $55 \text{ dt TM ha}^{-1}$  bis  $65 \text{ dt TM ha}^{-1}$ , Holderbaum et al. (1990) berichten über  $81 \text{ dt TM ha}^{-1}$ , Gselman & Kramberger (2008) ernteten  $44 \text{ dt TM ha}^{-1}$ .

Wildformen des Inkarnatklees sind in Spanien zu finden, von dort kam er nach Ost- und Nordeuropa (Geisler 1980). Inkarnatklee gilt als eine an milde Winter angepasste Futterleguminose, mit der Fähigkeit im Herbst und Frühjahr zügig zu wachsen (Lloveras & Iglesias 2001). Demzufolge war der Witterungsverlauf beider Versuchsjahre, mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen während der gesamten Winterperiode sowie das Fehlen der winterlichen Frostereignisse, außerordentlich günstig für die Biomasseakkumulation des Inkarnatklees. In Deutschland sind lediglich zwei Inkarnatklee-Sorten in der „Beschreibenden Sortenliste“ des Bundessortenamtes (Bundessortenamt 2007) eingetragen; die im Versuch angebaute Sorte „Linkarus“ ist erst seit dem Jahr 2000 in der Liste verzeichnet. Ihr wurde bei der Prüfung der Jugendentwicklung „Massebildung im Anfang“ und bei dem Prüfparameter „TM-Ertrag 1. Schnitt“ eine Ertragserhöhung gegenüber der Sorte

„Heusers Ostsaat“, die bereits seit 1957 zugelassen ist, bestätigt. Inwieweit sich mit der der Sorte „Linkarus“ auch in weniger milden Wintern hohe Erträge realisieren lassen, bleibt abzuwarten.

In beiden Versuchsjahren konnte auch der Gemengeanbau der Leguminosen Inkarnatklée und Zottelwicken mit der Nicht-Leguminose Welsches Weidelgras (Landsberger Gemenge) hohe Biomasseerträge erbringen. Während des gesamten Versuchszeitraumes war der Ertrag dieses Gemenges höher als der Ertrag von Zottelwicken in Reinsaat. Der Ertrag des Landsberger Gemenges war stets auf dem hohen Ertragsniveau der Weidelgras-Varianten sowie des Inkarnatklees und folglich im oberen Ertragsbereich. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit des Inkarnatklees und des Welschen Weidelgrases sowie der nur mittleren Leistungen der Zottelwicken in Reinsaat, erscheint es möglich, dass ein Anbau der beiden Gemengepartner Inkarnatklée und Welsches Weidelgras ohne Beteiligung von Zottelwicken, die Leistungsfähigkeit des Landsberger Gemenges noch übertreffen könnte. Allerdings ist auch hier die Winterfestigkeit des Inkarnatklees eine wichtige Voraussetzung für hohe Ertragssicherheit.

Als weiteres Gemenge einer Leguminose mit einer Nicht-Leguminose war das Gemenge aus Wicken und Roggen in der Prüfung. Bei diesem Gemenge zeigte sich eine leichte Überlegenheit gegenüber Winterroggen und Zottelwicken in Reinsaat bei den Ernten im Dezember, März und April. Bei der Beerntung im Mai des ersten Versuchsjahres war das Gemenge aus Wicken und Roggen gleich ertragreich wie Roggen, aber deutlich stärker als Wicken in Reinsaat; im zweiten Versuchsjahr war das Gemenge aus Wicken und Roggen ebenfalls ertragsstärker als Wicken in Reinsaat und aber auch deutlich stärker als Roggen in Reinsaat. Zu berücksichtigen ist hier, dass das Gemenge aus Wicken und Roggen sowie Zottelwicken zu dem frühen Saattermin gedrillt wurden, der Roggen in Reinsaat zum späteren Aussaattermin, sodass Roggen aufgrund der bereits geschilderten Aussaatprobleme im zweiten Jahr nur sehr geringe Erträge erbrachte. Betrachtet man nur die Erträge des ersten Versuchsjahres, so zeigt das Gemenge Wicken und Roggen hinsichtlich der Trockenmassebildung keine höhere Leistung als der Roggen in Reinsaat.

Im Allgemeinen soll der Anbau eines Gemenges aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen zu höheren Erträgen aufgrund eines Stickstofftransfers von der Leguminose zur Nicht-Leguminose führen. Diesen Zusammenhang beschreiben Ta & Faris (1987) nach einem Experiment mit verschiedenen Leguminosen und Gräsern. Bestätigt werden die Beobachtungen von Stickstofftransfers durch Sainju et al. (2005). Karpenstein-Machan & Stülpnagel (2000) bauten Gemenge aus Wicken und Roggen sowie aus Inkarnatklée und Roggen an und fanden höhere Erträge bei den Gemengen als bei den Reinsaaten.

Kuo & Jellum (2002) untersuchten Zottelwicken in Reinsaat und im Gemenge mit Roggen; sie ernteten vom Gemenge mehr Biomasse als von den Reinsaaten. Auch hier könnte der Stickstofftransfer eine Rolle gespielt haben, allerdings bauten sie die Winterzwischen-

---

früchte über mehrere Jahre auf denselben Parzellen an, sodass hier möglicherweise langfristige Nährstofftransferleistungen stattfanden.

Im eigenen Versucht konnte dieser Effekt mit deutlich höheren Erträgen des Gemenges aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen gegenüber den Erträgen der Gemengepartner in Reinsaat weder beim Anbau des Gemenge aus Wicken und Roggen noch beim Landsberger Gemenge bestätigt werden. Möglicherweise kam es wegen der hohen Mineralisation aufgrund der warmen Witterung nicht zu Stickstoffmangelsituationen in denen der Roggen von Stickstofffreisetzungen der Leguminosen hätte profitieren können. Ebenfalls fand Vetter (2010) keine höheren Erträge durch die Anbaukombination mit einer Leguminose. Er verglich dabei Roggen in Reinsaat mit dem Gemenge Roggen/Erbsen im Winterzwischenfruchtanbau. Clark et al. (1994) verglichen Zottelwicken und Winterroggen mit dem Gemenge aus Wicken und Roggen. Sie ernteten stets mehr Biomasse von Roggen als von Zottelwicken. Das Gemenge aus Wicken und Roggen lag bei früher Ernte (Anfang bis Mitte April) auf dem gleichen Niveau wie Roggen, bei vierwöchig verspäteter Ernte lag der TM-Ertrag des Gemenges über dem Ertrag des Roggens. Folglich ist ein Ertragsvorteil der Gemenge von vielen Einflüssen, z.B. dem Erntetermin, den Witterungsbedingungen und den Mineralisationsraten abhängig.

Auch das Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich zeigte keine größere Trockenmasseakkumulation als Triticale oder Spitzwegerich in Reinsaat; es lag beim Ertrag im ersten Versuchsjahr auf dem Niveau der Triticale in Reinsaat. Im Mai 2008 war das Gemenge Triticale/Spitzwegerich schlechter als Spitzwegerich in Reinsaat, wobei allerdings Spitzwegerich im Gegensatz zu den beiden Triticale-Varianten zu den früh gesäten Varianten zählte. Wie die bereits genannten Gemenge erbrachten sämtliche geprüfte Gemengevarianten keine höheren Trockenmasse-Erträge als der jeweils ertragsstärkste Gemengepartner des Gemenges in Reinsaat. Hinsichtlich der Trockenmasseakkumulation brachte also der Anbau von Gemengen im vorgestellten Versuch keine Vorteile.

Insgesamt war das Ertragsniveau im zweiten Versuchsjahr etwas geringer als im ersten. Besonders auffällig ist jedoch der geringe TM-Ertrag des Markstammkohls im zweiten Versuchsjahr. Bei der Ernte im Dezember 2007 war der Ertrag des Markstammkohls der geringste unter den Kreuzblütlern mit nur 9 dt TM ha<sup>-1</sup> und nur vier der früh gesäten Varianten waren schwächer, während im ersten Versuchsjahr bei Markstammkohl mit 25 dt TM ha<sup>-1</sup> im Dezember 2006 der zweithöchste Ertrag aller Prüfglieder realisiert wurde. Auch die folgenden Beerntungen des zweiten Versuchsjahres zeigten geringe Erträge bei Markstammkohl, bei der Ernte im April 2008 entsprach der Ertrag etwa einem Drittel des Ertrages vom Vorjahr (23 dt TM ha<sup>-1</sup> bzw. 68 dt TM ha<sup>-1</sup>). Ähnliche Ertragsdifferenzen wurden auch bei Knaulgras sichtbar. Hier konnte im Mai des ersten Versuchsjahres mit 74 dt TM ha<sup>-1</sup> ein Ertrag erzielt werden, der nur leicht unter dem Durchschnitt aller Varianten lag (Mittlere Spross-TM im Mai 2008 war 77,4 dt TM ha<sup>-1</sup>), hingegen wurde im Mai des zweiten Versuchsjahres von den früh gesäten Varianten nur bei Gelbem Steinklee weniger Spross-TM als bei Knaulgras geerntet. Wahrscheinlich haben die feuchten Bodenbe-

dingungen zur Zeit der Keimung und in der Auflaufphase im Herbst 2007 sowie ständige Niederschlagsereignisse in diesem Zeitraum der Pflanzenentwicklung des Knaulgrases geschadet. Sowohl Markstammkohl als auch Knaulgras müssen aufgrund der großen Ertragsschwankungen, bei allerdings extrem feuchter Witterung im Herbst des zweiten Versuchsjahres, als wenig ertragssicher eingestuft werden.

Außer Rübsen in Reinsaat und Rübsen im Gemenge mit Markstammkohl sowie Zottelwicken und Rotklee konnte im Mai des zweiten Versuchsjahres keine Variante einen höheren Ertrag erbringen als im Mai des ersten Versuchsjahres. Die Ertragsdifferenzen zum Vorjahr waren bei Rübsen (+22 dt TM ha<sup>-1</sup>) und bei Rotklee (+13 dt TM ha<sup>-1</sup>) beachtlich. Die Entwicklung der Biomasse im Jahresablauf verlief bei Winterrübsen in beiden Jahren bis zum April etwa gleich, im letzten Versuchsabschnitt von April 2008 bis Mai 2008 konnte bei dieser Variante jedoch deutlich mehr Biomasse aufgebaut werden als im Vorjahr. Die Witterung im ersten Versuchsjahr war unter anderem gekennzeichnet, durch einen sehr trockenen April 2007 mit nur 3 mm Niederschlag und einen überdurchschnittlich feuchten Mai, während im Folgejahr die Niederschlagshöhe im April 2008 dem langjährigen Mittel entsprach. Folglich könnte eine Wassermangelsituation im April des ersten Versuchsjahres eine Ertragsdepression bei einigen Varianten bewirkt haben, die im zweiten Jahr nicht aufgetreten ist.

Der Ertrag der Spross-Trockenmasse umfasste im Mai 2007 eine Spanne die von 91 dt TM ha<sup>-1</sup> (Mittelwert der Pflanzengruppe „Getreide“) bis zu 62 dt TM ha<sup>-1</sup> (Mittelwert der Gruppe „Kreuzblütler“) reichte. Im Mai des zweiten Versuchsjahres lagen die durchschnittlichen Sprossmassen bei 55 dt TM ha<sup>-1</sup> (Futtergrasarten) bis 31 dt TM ha<sup>-1</sup> (Getreide). Daten über Trockenmasse-Erträge von Winterzwischenfrüchten sind in der Literatur eher spärlich zu finden und werden meist mit großen Spannweiten angegeben (Fischbeck 1982, Lütke Entrup & Oehmichen 2000, Lütke Entrup 2001). Thorup-Kristensen (2001) nennt Zwischenfruchterträge von 25 dt TM ha<sup>-1</sup> (Winterroggen) bis 50 dt TM ha<sup>-1</sup> (Rettich). Rinnofner et al. (2006) bauten Futtererbsen, Saatwicken, Platterbsen, Phacelia, Ölrettich und Stoppelrüben an und ernteten 35 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 60 dt TM ha<sup>-1</sup>. Lütke Entrup (2001) nennt Erträge von 77 dt TM ha<sup>-1</sup> (Welsches Weidelgras) bis 97 dt TM ha<sup>-1</sup> (Roggen) bei einer Beerntung am 18. Mai, hingegen lagen die Erträge bei lediglich 57 dt TM ha<sup>-1</sup> (Welsches Weidelgras) bzw. 65 dt TM ha<sup>-1</sup> (Roggen) wenn die Ernte bereits am 28. April erfolgte. Aigner & Sticksele (2010) bestätigen die hohe Leistungsfähigkeit des Winterroggens; im dreijährigen Mittel erzielten sie Trockenmasse-Erträge von 82,6 dt TM ha<sup>-1</sup> wenn die Ernte des Roggens im Mai erfolgte. Geringe Roggenerträge (2,6 bis 16,2 dt TM ha<sup>-1</sup>) erzielten Kessavalou & Walters (1997) wenn Roggen nach Sojabohnen angebaut wurde. Haas (2003) nennt einen Ertrag von Inkarnatklee im Gemenge mit Zottelwicken von 81 dt TM ha<sup>-1</sup>. Mit höheren Erträgen von Roggen und Einjährigem Weidelgras (TM-Ertrag über 40 dt TM ha<sup>-1</sup>) gegenüber Leguminosen und Kreuzblütlern bestätigen Kuo et al. (1997a) die Rangfolge, die auch im vorgestellten Versuch gefunden wurde.

Der praxisübliche Termin zur Ernte der Winterzwischenfrüchte ist vielerorts Mitte April, wenn anschließend die Einsaat von Mais erfolgen soll. Der frühe Termin wird gewählt, um das hohe Leistungsvermögen des nachfolgend angebauten Energiemaisses durch einen verlängerten Vegetationszeitraum voll ausschöpfen zu können. Die Winterzwischenfrüchte im eigenen Versuch zeigten zum Zeitpunkt im April Erträge zwischen 10 und 68 dt TM ha<sup>-1</sup> (erstes Versuchsjahr) bzw. 3 und 63 dt TM ha<sup>-1</sup> (zweites Versuchsjahr). Insbesondere die Getreidevarianten und die großkörnigen Leguminosen erzielten bis zu diesem Zeitpunkt eine unbefriedigende Menge an Spross-Trockenmasse. Betrachtet man indes die Erntemenge die im Mai, also etwa fünf Wochen später erzielt wurde, so wird klar, dass bei frühzeitiger Ernte im April sehr hohes Wachstumspotential der Winterzwischenfrüchte ungenutzt bleibt. Die Ertragssteigerung in diesen fünf Wochen betrug bis zu 63 dt TM ha<sup>-1</sup> (erstes Versuchsjahr) bzw. 45 dt TM ha<sup>-1</sup> (zweites Versuchsjahr), die mittleren Ertragszuwächse aller 33 Prüfglieder lagen bei 37 dt TM ha<sup>-1</sup> (erstes Versuchsjahr) bzw. 25 dt TM ha<sup>-1</sup> (zweites Versuchsjahr). Die besonders hohen Wuchsleistungen in dieser Zeitspanne werden durch die Wachstumsraten wiedergegeben (Abbildung 5 und Abbildung 6). Die Ackerbohnen und das Landsberger Gemenge, insbesondere aber die Getreide-Varianten können hier Raten von über 18 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> erreichen und liegen damit auf einem Niveau, welches Gardner et al. (1985) als maximal mögliche Wachstumsraten zum Beispiel für Sojabohnen, Bermudagrass oder Luzerne angeben. Bemerkenswert ist, dass die im hier vorgestellten Versuch beobachteten Wachstumsraten von z.B. 18 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> einen Mittelwert über 35 Tage darstellten und davon auszugehen ist, dass an einigen Tagen die Wachstumsraten noch höher waren. Von sehr hohen Tageszuwächsen bei dem Gemenge aus Wicken und Roggen, die über 25 g organischer Trockenmasse je m<sup>2</sup> pro Tag in der Zeitspanne vom 17. April bis 28. April betrug, berichten auch Könekamp und Zimmer (1955) und bestätigen damit die günstigen Wachstumsbedingungen, die in dieser Zeit des Jahres häufig gegeben sind. Clark et al. (1994) fanden Ertragssteigerungen von Winterzwischenfrüchten bei früher Ernte Anfang April bis zur etwa 4 Wochen späteren Ernte, die bei 159% (3015 bzw. 7810 kg TM ha<sup>-1</sup>) lagen. Odhiambo & Bomke (2001) bestätigen hohe Zuwächse in einem Zeitraum von Ende März bis Anfang Mai und betonen, dass die geprüften Varianten deutlich höhere Zuwächse erzielten, wenn sie zu einem früheren Termin (23. August versus 20. September) ausgesät worden waren.

Der hohe Trockenmasse-Ertrag der Getreide-Varianten konnte, wie beschrieben, erreicht werden durch die hohen Wachstumsraten im April/Mai; hingegen konnten die Kreuzblütler diese hohen Zuwachsraten nicht realisieren. Die Kreuzblütler zeigten jedoch insbesondere im ersten Versuchsjahr zur Ernte schon im April recht hohe Trockenmasse-Erträge (Tabelle 10 und Tabelle 14). So war der Trockenmasse-Ertrag des Markstammkohls im April 2007 noch signifikant höher als der Ertrag des Winterroggens der Sorte „Recrut“. Zur Ernte im Mai lag der Ertrag der genannten Roggen-Variante (Sorte „Recrut“) dagegen etwa 18 dt TM ha<sup>-1</sup> über dem Ertrag des Markstammkohls. Ähnliche Konstellationen konnten bei Winterraps „Mikonos“ und dem Gemenge aus Raps und Wegwarte beobachtet werden; auch diese Varianten zählten im April zu den Varianten mit höchsten Trocken-

masse-Erträgen, im Mai jedoch zu den ertragsschwächeren Varianten (erstes Versuchsjahr). Somit ist der Anbau von Kreuzblütlern interessant, wenn eine sehr frühzeitige Ernte in April geplant wird, hingegen können die Getreide-Varianten von einer längeren Wachstumszeit im Frühjahr sehr viel stärker profitieren.

Die Beobachtung der höheren Wachstumsraten der Getreide-Varianten gegenüber den Kreuzblütlern ließ sich im zweiten Versuchsjahr nicht bestätigen. Zwar wiesen die Kreuzblütler im zweiten Versuchsjahr etwa gleiche Wachstumsraten im April/Mai auf wie im ersten, jedoch konnten die Getreide-Varianten die hohen Wachstumsraten des ersten Versuchsjahres nicht erreichen. Wahrscheinlich ist auch hier die verspätete Aussaat im zweiten Versuchsjahr, die zu Beständen mit geringen TM im Frühjahr führte, die Ursache.

Inwieweit der Verzicht auf die Biomassebildung der Winterzwischenfrüchte im April/Mai durch frühen Umbruch und „termingerechte“, frühest mögliche Aussaat von der nachfolgenden Maiskultur kompensiert oder übertroffen werden kann, wird häufig diskutiert. Böhmel & Claupen (2006) überprüften zwei Strategien im Anbau von Energiepflanzen, bei denen „hoher Zwischenfruchtertrag“ und „hoher Maisertrag“ verglichen wurden. Bei der Strategie „hoher Zwischenfruchtertrag“ wurde der Mais 18 Tage später gesät als bei der Variante „hoher Maisertrag“ um hier die hohen Zuwachsraten der Winterzwischenfrüchte nutzen zu können. Es wurden Mehrerträge der Kombination aus Winterzwischenfrüchten und Energiemais bei der Variante „hoher Zwischenfruchtertrag“ erzielt; diese waren auf signifikant höhere Erträge der Winterzwischenfrüchte aber annähernd gleiche Maiserträge zurückzuführen. Auch Graß (2003) berichtet von gleich hohen Erträgen bei normaler und verspäteter Maisaussaat und weist darauf hin, dass die Spätsaatverträglichkeit sortenabhängig sei. Lütke Entrup et al. (2008) fanden in einem Versuchsjahr ebenfalls sortenabhängige Ertragsdifferenzen bei verspäteter Aussaat von Energiemais, im nachfolgenden Versuchsjahr wurde bei zweiwöchiger Verzögerung der Maissaat (28. April 2005 bzw. 13. Mai 2006) kein Ertragsunterschied sichtbar. Sie führen dies auf eine verzögerte Jugendentwicklung des früh gesäten Maises aufgrund kühler Witterung im Mai zurück. Scheffer et al. (1984) fanden annähernd gleiche Maiserträge bei der Aussaat Ende April, Mitte Mai oder Ende Mai und erklären die gefundene Erhöhungen der Blattzahl je Pflanzen und Kornzahl pro Kolben bei später Saat mit photoperiodischen Einflüssen.

Wagger (1989a, 1989b) hingegen fand höhere Maiserträge bei früher Aussaat und stellte fest, dass bei frühem Umbruch die mikrobielle Umsetzung der eingearbeiteten Biomasse und Freisetzung von Stickstoff schneller erfolgte aufgrund geringerer Gehalte an Zellulose, Hemizellulose und Lignin in der Biomasse. Der frühzeitig freigesetzte Stickstoff führte hier zur höheren Ertragsleistung durch eine bessere Synchronisation von Mineralisation im Boden und Stickstoffbedarf der Maispflanzen. Roth et al. (2009) fanden gleiche Maiserträge bei Aussaat zwischen dem 11. April und dem 22. Mai; jedoch deutliche Ertragseinbußen bei Aussaat des Maises ab dem 5. Juni. Der Ertrag des Maises wird folglich nicht allein durch den Saattermin bestimmt, es treten in jedem Jahr sehr große Ertragsschwankungen auf; die frühe Aussaat ist daher nicht in jedem Fall zu bevorzugen.

Versuchsweise wird auch der Anbau von alternativen Energiepflanzen als Zweitkultur getestet, zum Beispiel Sorghum. Bei geplantem Anbau von Sorghum nach Winterzwischenfrüchten bringt ein früher Umbruch und frühe Aussaat des Sorghums keine Vorteile, da diese Pflanzenart zur Keimung höhere Bodentemperaturen als Mais benötigt und diese in der Regel Anfang Mai nicht angetroffen werden. Hier könnte die Winterzwischenfrucht daher bedenkenlos länger kultiviert werden. Die Ertragsleistung von Sorghum ist allerdings zurzeit noch geringer als die des Mais (Vetter 2009, Vogler 2010).

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass die Anforderung zur Produktion beträchtlicher Biomasse für die Verwendung in Biogasanlagen mit dem Anbau von Winterzwischenfrüchten erfüllbar ist, wobei jedoch neben der gewählten Pflanzenart auch der Erntetermin der Winterzwischenfrucht eine entscheidende Rolle spielt.

#### 4.1.2 Stickstoff in der Sprossmasse

Bei der Messung der sprossgebundenen Stickstoffmengen zeigte sich, dass besonders die Kreuzblütler sowie deren Gemenge, aber in ähnlicher Weise auch die Weidelgras-Varianten in der Lage waren, bereits im Dezember große Stickstoffmengen zu binden. Auch die kleinkörnigen Leguminosen und einige Gemenge mit diesen Leguminosen zeigten große Stickstoff-Mengen in der oberirdischen Biomasse; geringe Stickstoffmengen im Spross hingegen zeigten die Wintergetreide-Varianten. Diese Rangfolge der Pflanzengruppen bestätigt Thorup-Kristensen (2001). Er berichtet von einem Experiment mit Zwischenfrüchten, die bereits Anfang August gesät wurden und deren sprossgebundene Stickstoffmengen Mitte November gemessen wurden. Hier waren die Stickstoffmengen im Spross von Futterrettich und Raps etwa gleich hoch wie von Zottelwicken und dem Gemenge aus Wicken und Roggen (160 und 148 kg N ha<sup>-1</sup> beziehungsweise 153 und 143 kg N ha<sup>-1</sup>) aber deutlich höher als von Getreide (Roggen, 91 kg N ha<sup>-1</sup>).

Betrachtet man die Relation der Spross-Trockenmasse zur Stickstoffmenge im Spross, so zeigt sich, dass die Getreide-Varianten im Dezember 2006 zwar nur etwa ein Viertel des Trockenmasse-Ertrages der Futtergrasarten produzieren, jedoch die halbe Menge der Stickstoffmasse der Futtergrasarten im Spross speichern. Die Stickstoffgehalte im Spross der Getreide-Varianten sind folglich etwa doppelt so groß wie die Stickstoffgehalte der Futtergrasarten. Höhere Stickstoffgehalte im Spross von Roggen als in Futterrettich und Weidelgras bestätigen auch Thorup-Kristensen (1994) und Kristensen & Thorup-Kristensen (2004). Das bedeutet, die Getreide-Varianten nehmen Stickstoff auf, produzieren aber weniger Biomasse als andere Pflanzenarten. Dieses kann mit der Auslese der Sorten auf Winterfestigkeit zusammenhängen; ein verhaltenes Wachstum vor Winter vermindert die Gefahr durch Frost Schaden zu erleiden. Außerdem stellt die Akkumulation von Stickstoff einen Speicher für die Pflanze dar, aus dem sie in einer Phase mit günsti-

---

gen Wachstumsbedingungen und begrenzter Nährstoffaufnahme, durch Umlagerungen Mangelsituationen entschärfen könnte.

Möglicherweise hat auch die späte Aussaat der Wintergetreide-Varianten einen negativen Einfluss auf die im Spross gebundene Stickstoffmenge. Vos & van der Putten (1997) berichten von einer linearen Beziehung zwischen dem Saattermin und der Stickstoffaufnahme von Getreide und Kreuzblütlern. Sie fanden sinkende Stickstoffaufnahmen, mit jedem Tag verspäteter Aussaat ab Ende August, um etwa  $0,2 \text{ g N m}^{-2}$ .

Die Stickstoffkonzentration der Getreidevarianten war im Dezember des zweiten Versuchsjahres ebenfalls deutlich höher als bei den übrigen geprüften Pflanzengruppen. Dennoch reichte aufgrund der geringen Sprosstrockenmasse der Getreide-Varianten der höhere Stickstoffgehalt in der Pflanzenmasse von Getreide nicht aus, um das Niveau der sprossgebundenen Stickstoffmenge der übrigen geprüften Varianten zu erreichen bzw. die  $N_{\text{min}}$ -Werte wie viele der übrigen Prüfglieder stark abzusenken.

Im zweiten Versuchsjahr war in nahezu allen Varianten zum Ende der Vegetationszeit (Dezember) weniger Stickstoff im Spross als im ersten Versuchsjahr. Allerdings war im Herbst des zweiten Versuchsjahres auch weniger  $N_{\text{min}}$  im Boden gemessen worden. Dies zeigt, dass die Stickstoffaufnahme der Winterzwischenfrüchte bei hohem Nährstoffangebot größer sein kann und insbesondere im zweiten Versuchsjahr nicht alle Aufnahmekapazität ausgeschöpft war.

Entsprechend konnten Ilgen (1980), Vos & van der Putten (1997) und Schröder et al. (1997) nachweisen, dass die Stickstoffaufnahme von Winterzwischenfrüchten im Herbst stark vom Stickstoffangebot abhängig ist. Sie berichten, dass die Pflanzen zunehmend Stickstoff aufnehmen konnten, wenn weitere Nährstoffe (z.B. durch Düngung) angeboten wurden.

Ein kontinuierlicher Anstieg der Stickstoffmengen im Spross konnte bei den Beprobungen nach dem Winter (März, April und Mai) festgestellt werden. Die sprossgebundenen Stickstoffmenge betrug bei den Nicht-Leguminosen im Mai etwa  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $110 \text{ kg N ha}^{-1}$  (2007) bzw.  $27 \text{ kg N ha}^{-1}$  bis  $75 \text{ kg N ha}^{-1}$  (2008). Die Kreuzblütler zeigten im ersten Versuchsjahr lediglich bis zum April eine ansteigende Stickstoffmenge in der Sprossmasse; im Mai wurden bei allen Varianten, auch den Gemengen mit Kreuzblütlern, geringere Stickstoffmengen im Spross als bei der Messung im April festgestellt. Hier haben vermutlich die Translokation von Stickstoff in die Pflanzenwurzel und zusätzlich der Abwurf von Blättern aufgrund der überdurchschnittlich hohen Temperaturen in Kombination mit geringen Niederschlägen im April 2007 (etwa 3 mm) zu geringeren Stickstoffmengen in der oberirdischen Biomasse geführt. Möglicherweise konnte der nachfolgende Mais von dieser auf dem Feld zurückgelassenen Stickstoffmenge profitieren; relativ hohe Maiserträge nach dem Anbau von Kreuzblütlern deuten darauf hin.

Unter den Gerstensorten zeigte in beiden Jahren die Sorte „Dorothea“ an allen Terminen die geringste sprossgebundene Stickstoffmenge. Bei dieser Sorte handelt es sich um eine Gerstensorte, die zur Verwendung als Braugerste geeignet ist (Bundessortenamt 2007). Braugerste soll zum Zeitpunkt der Druschreife geringe Proteingehalte im Korn aufweisen, hierfür ist die geringe Stickstoffaufnahme aus dem Boden, die auch an den weniger stark abgesenkten N<sub>min</sub>-Werten (Abbildung 16) sichtbar wird, eine günstige Voraussetzung. Für die Bindung von Stickstoff im Herbst und Winter ist diese Eigenschaft jedoch hinderlich.

Auffällig hoch waren die Stickstoffmengen im Spross der Wegwarte in den Monaten April und besonders im Mai; so enthielt Wegwarte im Mai 2007 die gleiche Menge an Stickstoff im Spross wie die Roggen-Varianten, erzielte aber nur etwas mehr als den halben Trockenmasse-Ertrag. In ähnlicher Weise verhielt sich auch Spitzwegerich, hier war besonders bei den Beprobungen im April im Vergleich zu den übrigen Prüfgliedern relativ viel Stickstoff in der Trockenmasse gebunden. Die Kräuter-Varianten konnten trotz erheblicher Aufnahme von Stickstoff diesen nicht so effektiv in die Bildung weiterer Biomasse umsetzen wie die züchterisch bearbeiteten Kulturpflanzen des Versuchs.

Im Mai des ersten Versuchsjahres war die Pflanzengruppe mit den höchsten Stickstoffmengen im Spross die Gruppe der Leguminosen, gefolgt von Kräutern, Getreide, Futtergrasarten und Kreuzblütlern. Im zweiten Jahr waren ebenfalls die Leguminosen die Pflanzengruppe mit der höchsten Stickstoffmenge im Spross, gefolgt von Kreuzblütlern, Kräutern, Futtergrasarten und Getreide. Hier muss erneut auf die besonderen Umstände hinsichtlich der spät gesäten Varianten im zweiten Versuchsjahr hingewiesen werden.

Eine ähnliche Rangfolge wie sie im ersten Versuchsjahr gefunden wurde, bestätigen Kuo et al. (1997b) Sie fanden bei der Stickstoffakkumulation von Winterzwischenfrüchten die Abfolge: Leguminosen > Getreide > Futtergras > Kreuzblütler.

Die in der Literatur angegebenen Werte zum Stickstoff in der Sprossmasse variieren sehr stark, es werden Werte von 34 kg N ha<sup>-1</sup> bis 351 kg N ha<sup>-1</sup> genannt (Holderbaum et al., 1990). Decker et al. (1994) fanden Stickstoffwerte im Spross, die bei Zottelwicken 205 kg N ha<sup>-1</sup>, bei Wintererbsen 180 kg N ha<sup>-1</sup>, bei Inkarnatklee 170 kg N ha<sup>-1</sup> und bei Winterweizen 40 kg N ha<sup>-1</sup> betragen. Haas (2004) ermittelte bei Winterzwischenfrüchten Stickstoffmengen im Spross von 65 kg N ha<sup>-1</sup> bis 200 kg N ha<sup>-1</sup> bei Leguminosen und 20 kg N ha<sup>-1</sup> bis etwa 90 kg N ha<sup>-1</sup> bei Nicht-Leguminosen. Sehr hohe Stickstoffmengen von bis zu 350 kg N ha<sup>-1</sup> fanden Eichler et al. (2004) in Kreuzblütlern. Thorup-Kristensen (2001) berichtet von etwa 100 kg N ha<sup>-1</sup> in Roggen und von über 160 kg N ha<sup>-1</sup> in Kreuzblütlern. Kessavalou & Walters (1997) fanden 76 kg N ha<sup>-1</sup> in Roggen. Power et al. (1991) fanden in vier Versuchsjahren Stickstoffmengen zwischen etwa 19 kg N ha<sup>-1</sup> und 81 kg N ha<sup>-1</sup> in Zottelwicken. Eine Spanne von 17 kg N ha<sup>-1</sup> für Roggen bis 200 kg N ha<sup>-1</sup> für Zottelwicken nennen Rannels & Wagger (1996). Vos & van der Putten (1997) berichten über Stickstoffaufnahmen in den Spross von Winterzwischenfrüchten, die bei 1,07 g N m<sup>-2</sup>

---

bis  $14,13 \text{ g N m}^{-2}$  ( $= 10,7 \text{ kg N ha}^{-1}$  bzw.  $141,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) liegen können. Somit bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass die Werte des vorgestellten Versuches insgesamt vom Niveau mit den Werten anderer Autoren übereinstimmen.

Im vorgestellten Versuch wurden z.T. sehr hohe sprossgebundene Stickstoffmengen von über  $300 \text{ kg N ha}^{-1}$  ermittelt. Bei der Nutzung der Biomasse in Biogasanlagen sind hohe Stickstoffgehalte im Gärsubstrat jedoch nicht willkommen (Berendonk 2008), da der u. a. in den Aminosäuren enthaltene Schwefel von sulfatreduzierenden Mikroorganismen zu Schwefelwasserstoff abgebaut wird (Aschmann et al. 2007). Schwefelwasserstoff gilt als giftig für methanbildende Mikroorganismen (Jäkel 2007) und führt in der Biogasanlage zu Korrosionsschäden (Weiland 2004).

Des Weiteren spielen Stickstoff-Verbindungen bei der Entstehung von Schaum in Biogasanlagen eine wichtige Rolle. Laut Moeller et al. (2010) wird die Schaumbildung im Biogasfermenter durch den Proteinabbau und der damit verbundenen Entstehung von Ammonium begünstigt. Des Weiteren steht Ammonium mit Ammoniak in einem Dissoziationsgleichgewicht, sodass laut Moeller et al. (2010) mit zunehmendem Ammonium auch das als Zellgift wirkende Ammoniak zunimmt. Bereits ab einer Ammoniak-Konzentration von  $0,15 \text{ g l}^{-1}$  wird die Methanbildung im Fermenter gestört (Schattauer & Weiland 2009).

Eventuell ist auch im eigenen Versuch der geringe spezifische Methangehalt der Leguminosen (Tabelle 20), auf die hohen Stickstoffmengen in der Sprossmasse zurückzuführen. Die Werte des spezifischen Methangehaltes entstammen einer Analyse, die in Form eines praktischen Gärversuchs erfolgte. In diesem Gärversuch könnte die genannte Störung durch sehr hohe Stickstoffmengen im Spross der Leguminosen (Tabelle 19) aufgetreten sein.

Andererseits kann der Stickstoffgehalt im Gärsubstrat auch positiv bewertet werden; laut Abschätzung von Willms et al. (2009) sind rund 50% des Stickstoffs im Erntegut als mineraldüngeräquivalent im Gärrest zu bewerten. Nach der Vergärung stickstoffreichen Pflanzenmaterials steht bei einer Düngung mit dessen Gärresten somit ein höherwertiger Dünger zur Verfügung als bei der Vergärung von stickstoffarmer Biomasse. In welchem Verhältnis die Kosten durch Entschwefelung und Unterbindung der Schaumbildung zur höheren Düngewirkung der stickstoffreichen Substrate steht, bedarf einer noch ausstehenden ökonomischen Bewertung.

Der Anbau von Winterzwischenfrüchten verfolgte in der Vergangenheit zwei Nutzungsziele: erstens die Nutzung als stickstoffkonservierende Gründüngungspflanze oder zweitens als Futterpflanze. Bei beiden Verwendungszwecken war ein hoher Stickstoffgehalt, entweder als Nährstoffquelle für die Folgefrüchte oder als Futter-Protein, erwünscht. Beim Anbau von Energiepflanzen zur Nutzung in Biogasanlagen ist ebenso wie bei den genannten Verwendungsrichtungen die schnelle Bindung von mineralisiertem Stickstoff gewünscht. Das Erntegut sollte aber hier nur wenig Stickstoff enthalten. Dieser Forderung

entsprechen am besten die Kreuzblütler, Futtergrasarten und Spitzwegerich, die allerdings zum Teil keine ausreichende Biomasseproduktion zum Erntetermin im Mai zeigten. Die Getreide-Varianten konnten hohe Trockenmasse-Erträge erbringen, jedoch war bei diesen die Stickstoffbindung durch die Biomasse zum Winterbeginn gering. Am wenigsten geeignet hinsichtlich der Lieferung von Biomasse mit geringen Stickstoffmengen im Spross sind die Leguminosen.

## 4.2 Silierfähigkeit der Winterzwischenfrüchte

Aufgrund des kontinuierlichen, ganzjährigen Bedarfs an energiereichem Pflanzenmaterial zur Beschickung der Biogasanlagen, ist es notwendig, dass das geerntete Grüngut möglichst verlustarm konserviert werden kann. In der Praxis wird die Konservierung durch Silagebereitung präferiert (Heiermann et al. 2009). Um eine buttersäurefreie Silage zu erhalten werden neben allgemeiner technischer Anforderungen bezüglich Verdichtung und Häcksellänge auch bestimmte Ansprüche hinsichtlich der Trockenmassegehalte und des Verhältnisses der wasserlöslichen Kohlehydrate (Z) zur Pufferkapazität (PK) an das Siliergut gestellt (Pahlow & Weißbach 1999). Mit Hilfe der drei genannten Parameter lässt sich der Vergärbarkeitskoeffizient (VK; Schmidt et al. 1971) ermitteln, der es erlaubt, die potentielle Vergärbarkeit abzuschätzen. Die Errechnung des Vergärbarkeitskoeffizienten erfolgt nach der Formel:

$$VK = TM[\%] + 8 \frac{Z}{PK}$$

Der Trockenmassegehalt hat demgemäß einen direkten Einfluss auf den Vergärbarkeitskoeffizienten.

Für eine sichere Vergärung der Silage wird ein Vergärbarkeitskoeffizient von 45 (Weißbach 1973) angestrebt, wobei ein Mindestgehalt an Nitrat in der Biomasse von 4 g NO<sub>3</sub> kg TM<sup>-1</sup> (Kaiser & Weis 2003) vorausgesetzt wird. Da der Vergärbarkeitskoeffizient von frischer Biomasse häufig gering ist, ist es in vielen Fällen unumgänglich das frisch geerntete Grüngut anzuwelken, um durch die Erhöhung des Trockenmassegehaltes eine gesicherte Vergärbarkeit zu erreichen. Weißbach (2003) stellt Vergärbarkeitskoeffizienten verschiedener Leguminosen vor und erreicht durch Anwelken des Erntegutes auf 30% TM Vergärbarkeitskoeffizienten, die bei 37 bis 59 liegen. Faustzahlen für den Mindesttrockenmassegehalt verschiedener Futterpflanzen zur Silierung geben Knabe et al. (1986) an; sie liegen zwischen 28% für Weidelgrasarten bis 40% für Luzerne. Da im eigenen Versuch keine Bestimmung der Vergärbarkeitskoeffizienten erfolgte, wurde als Ziel für die Trockenmassegehalte ein Pauschalwert von 30% angenommen.

Die im eigenen Versuch ermittelten Trockenmassegehalte (Tabelle 16 und Tabelle 17) lagen im April der beiden Versuchsjahre am höchsten bei den Futtergras-Varianten, jedoch konnte keine Variante die gewünschten 30% Trockenmassegehalt erreichen, sodass vor einer Einsilierung zu diesem Erntetermin eine Anwelkphase nötig gewesen wäre. Insbesondere die Leguminosen zeigten zu diesem Zeitpunkt mit etwa 11% TM bis 16% TM (erstes Versuchsjahr) bzw. 12% bis 18% (zweites Versuchsjahr; außer Steinklee 22%) sehr geringe Trockenmassegehalte. Hier wäre wahrscheinlich ein mehrtägiges Anwelken des Erntegutes notwendig gewesen.

Zum Erntetermin im Mai waren die Trockenmassegehalte leicht höher als im April. Einige Varianten erreichten ein Niveau, welches eine direkte Ernte und Konservierung ermöglicht hätte. So erzielten das Gemenge aus Wicken und Roggen sowie die Getreide-Varianten im Mai des ersten, milden Versuchsjahres etwa 30% Trockenmassegehalt und waren damit hinsichtlich der erforderlichen Trockenmassegehalte als silierfähig zu bewerten. Jedoch erzielten die Leguminosen auch zum Erntetermin im Mai mit 13% bis 16% sowie die Kreuzblütler mit 19% bis 22% (erstes Versuchsjahr) sehr geringe Trockenmassegehalte. Im zweiten Versuchsjahr wurden auch bei dem Gemenge aus Wicken und Roggen sowie bei den Getreide-Varianten die erforderlichen 30% TM nicht erreicht.

Die im vorgestellten Versuch genannten Trockenmassegehalte der Winterzwischenfrüchte werden von Stülpnagel et al. (2009) bestätigt. Sie fanden bei der Nutzung von Rüben als Winterzwischenfrucht Trockenmassegehalte von etwa 20%, während Roggen und Gemenge mit Roggen leicht über 30% Trockenmassegehalt lagen.

Die Ernte der Winterzwischenfrüchte mit vorherigem Anwelken bewirkt ein verzögertes Räumen des Feldes, sodass die nachfolgende Kultur erst verspätet ausgesät werden kann. Dies ist insbesondere in der hochproduktiven Wachstumszeit im Mai als bedeutender Nachteil zu sehen. Des Weiteren ist das Anwelken mit Kosten durch zusätzliche Maschineneinsätze sowie der Gefahr durch Verschmutzung des Erntegutes oder Ertragsminderungen durch Bröckelverluste verbunden und somit stets unerwünscht.

Festzuhalten bleibt, dass die Trockenmassegehalte im Mai höher lagen als im April, jedoch lediglich im ersten Versuchsjahr bei einigen Wintergetreide-Varianten und dem Gemenge aus Wicken und Roggen eine direkte Einsilierung ohne Anwelken möglich gewesen wäre.

Ein alternatives Verfahren zur Nutzung von Winterzwischenfrüchten mit geringen Trockenmassegehalten könnte in der Entfeuchtung der Substrate durch ein mechanisches Abpressen von Presssaft liegen (Reulein et al. 2007, Poth et al. 2010). Wachendorf et al. (2007) stellen dieses Prinzip an Silage vor, deren (in einer Biogasanlage) schwerer vergärbaren Bestandteile durch Pressen abgetrennt werden. Ziel ist es, den gewonnenen Presssaft einer Biogasanlage zuzuführen und mit Wärme der häufig den Biogasanlagen

---

angeschlossenen Blockheizkraftwerke, die verbliebene Biomasse zu trocknen, um sie extern als Brennstoff einsetzen zu können.

## 4.3 Wurzelwachstum

### 4.3.1 Charakterisierung der Beprobungsvorgänge im Feldversuch

Die im vorgestellten Versuch ermittelten Wurzel­daten stammen aus Beprobungen mit Wurzelsonden. Dabei wurde in jeder Parzelle an zwei Stellen eine Probennahme bis in 30 cm Tiefe bzw. im Mai bis 60 cm durchgeführt. Die geringe Zahl der Einstiche und die relativ geringe Fläche die mit jedem Einstich erfasst wurde sowie die begrenzte Tiefe könnte zu einer Fehleinschätzung der untersuchten Wurzelproben geführt haben. Böhm (1979) fordert mindestens fünf Wiederholungen pro Parzelle um den statistischen Fehler gering zu halten, diese Forderung war aufgrund der großen Anzahl der Parzellen im vorgestellten Versuch aus arbeitstechnischer Sicht nicht erfüllbar.

Eine weitere Schwäche bei der Erfassung von Wurzel­daten liegt bei der Auswaschung der Wurzeln. Insbesondere sind die Feinwurzeln bei der Entfernung des Bodenmaterials in der Wurzelwaschanlage stark gefährdet fortgespült zu werden. Sauerbeck & Johnen (1976) konnten belegen, dass die Gesamtmenge an Wurzeln um 20% bis 50% größer war, als die Menge die durch Auswaschung der Wurzeln ermittelt wurde.

Eine sichere Aussage über die am Massenwachstum des Sprosses beteiligten Wurzel­massen kann aus den gewonnenen Wurzel­daten nicht erfolgen, da im vorgestellten Versuch nur eine Messung im Mai erfolgte, die Wurzel­masse jedoch einem ständigen Auf- und Abbau (Sauerbeck & Johnen 1976) unterworfen ist. So berichten Könekamp & Zimmer (1955) aus Versuchen mit Landsberger Gemenge, dem Gemenge aus Wicken und Roggen, Winterroggen und Welschem Weidelgras, die als Winterzwischenfrüchte angebaut wurden, dass deren Wurzel­massen Mitte Mai deutlich geringer waren als bei den Messungen Anfang Mai. Somit könnte bei den Versuchsdaten des eigenen Versuches, die Ende Mai gewonnen wurden, eine Unterschätzung der maximalen Wurzel­masse vorliegen.

Ericsson (1995) konnte nachweisen, dass das Wurzelwachstum durch die mangelhafte Nährstoffversorgung gefördert oder behindert wurde, je nachdem welche Nährstoffe den Mangel hervorriefen.

Laut Köhnlein und Vetter (1953) sind die Ergebnisse der Wurzelbeprobungen von vielen Faktoren, unter anderem der Bodenart, der organischen Substanz im Boden, der Beschaffenheit des Unterbodens, der Vorfrucht, der Wasserversorgung und Nährstoffversor-

gung abhängig. Klimanek (1987) nennt Wurzelmassen von Winterzwischenfrüchten und zitiert dabei aus diversen wissenschaftlichen Arbeiten. Die große Spannweite der von ihr genannten Wurzelmassen z.B. von Grünroggen (6,43 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 24,31 dt TM ha<sup>-1</sup>), dem Gemenge aus Wicken und Roggen (7,6 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 45,6 dt TM ha<sup>-1</sup>) und bei Winterraps (5,35 dt TM ha<sup>-1</sup> bis 23 dt TM ha<sup>-1</sup>) deuten an, wie stark die Wurzelmassen durch verschiedenartige Umweltbedingungen beeinflusst werden können.

Aus den genannten Gründen ist die Erfassung der Wurzeldata schwierig und eine Übertragung der dargestellten Daten auf andere Umweltbedingungen nur begrenzt möglich, allerdings kann der Vergleich der Varianten innerhalb des durchgeführten Versuches einige Hinweise auf die Größenordnung der vorhandenen Wurzelsysteme von Winterzwischenfrüchten geben.

### 4.3.2 Wurzelsysteme

Die Wurzelbeprobungen im Dezember zeigten in beiden Jahren die intensivste Durchwurzelung (höchste Wurzellängendichte) des Bodens durch die Weidelgras-Varianten. Eine hohe Wurzellängendichte zeigte stets auch das Landsberger Gemenge. Vermutlich waren hier überwiegend die Wurzeln des am Landsberger Gemenge beteiligten Welschen Weidelgrases für die gefundene Wurzellängendichte bestimmend. Die des Öfteren angesprochene Reihenfolge der Pflanzengruppen bezüglich der beobachteten Merkmale kann auch bei der Wurzellängendichte in ähnlicher Form für die Beprobung im Dezember gefunden werden, wobei die Wurzellängendichten sich zum Teil sehr stark unterschieden. Höchste Werte hatten hier die Futtergrasarten, mit großer Differenz folgten die Kreuzblütler, die kleinkörnigen Leguminosen und die Getreide-Varianten.

Auffällig hoch ist die Wurzellängendichte des Gemenges aus Wicken und Roggen; hier war vermutlich eine hohe Wurzellängendichte des Getreides ausschlaggebend. Allerdings lag die Wurzellängendichte des Gemenges auch oberhalb der Wurzellängendichte des Roggens in Reinsaat. Hier könnte wiederum der bereits genannte frühere Saattermin des Gemenges eine Rolle gespielt haben; das Gemenge aus Wicken und Roggen wurde zum früheren Saattermin ausgesät und konnte wahrscheinlich dadurch den Boden intensiver durchwurzeln.

Von den beiden geprüften Kräuterarten zeigte Spitzwegerich zu allen Terminen eine höhere Wurzellängendichte als Wegwarte, während Wegwarte zu jedem Termin mehr Wurzel-Trockenmasse aufwies. Beide Varianten konnten jedoch eine Absenkung der Nmin-Werte zum Dezember herbeiführen. Zu einem ähnlichen Ergebnis führt der Vergleich von Futtergrasarten und Kreuzblütlern: Beide Varianten hatten etwa gleiche Wurzel-Trockenmassen jedoch sehr große Differenzen hinsichtlich der Wurzellängendichte. So lagen die WLD der Futtergrasarten stets deutlich höher als die WLD der Kreuzblütler.

---

Jedoch waren Futtergrasarten und Kreuzblütler in der Lage die gewünschte Nmin-Absenkung zu realisieren. Dies zeigt, dass Pflanzenarten mit hoher Wurzelmasse und geringerer Wurzellängendichte ebenso geeignet sind den Bodennitrogen im Herbst aufzunehmen wie Pflanzenarten mit geringer Wurzelmasse und hoher Wurzellängendichte.

Folglich ist eine hohe Wurzellängendichte keine zwingende Voraussetzung für die effektive Absenkung der Nmin-Werte. Diese Schlussfolgerung bestätigt auch Thorup-Kristensen (2001), der bei einem Feldversuch nur einen schwachen Zusammenhang zwischen der Durchwurzelungsintensität und dem Gehalt an mineralisiertem Stickstoff im Oberboden (bis 0,50 m Tiefe) fand.

Auch Lainé et al. (1993) untersuchten Kreuzblütler und Gräser und kamen zu dem Ergebnis, dass die Kreuzblütler ein kleineres Wurzelsystem nutzen und damit ein geringeres Bodenvolumen erschließen, aber mit diesen Wurzeln mehr Nitrat, bezogen auf das Gewicht der Wurzeln, aufnehmen können als die Gräser. Lainé et al. (1993) ziehen den Schluss, dass die Brassica-Varianten daher besser angepasst sind lokale Nitrat-Anreicherungen zu erschließen.

Hohe Leistungsvermögen einzelner Wurzelabschnitte beschreiben auch Robinson et al. (1991). Sie stellen fest, dass nur ein Teil des Wurzelsystems aktiv sein müsse um die angebotenen Nährstoffe aufzunehmen und hohe Wurzellängen nicht zwingend zur Aufnahme von hohen Nitratmengen bedeutsam wären.

Zu dem gegenteiligen Ergebnis kommen Sainju et al. (1998). Sie untersuchten die Stickstoffaufnahme von Roggen, Zottelwicken und Inkarnatkliee sowie deren Durchwurzelungsintensität mit Hilfe von Minirhizotronen. Sie fanden geringere Nitrat-Werte unter Roggen als unter Wicken und Inkarnatkliee und führten die geringeren Nitrat-Werte des Roggens auf dessen intensivere Durchwurzelung zurück. Allerdings wurde in dieser Arbeit eine Nicht-Leguminose mit Leguminosen verglichen und unterschiedliche Stickstoffaufnahmen könnten aufgrund der Stickstofffixierung entstanden sein.

Obwohl die Art des Wurzelsystems nicht entscheidend ist um mineralisierten Stickstoff im Herbst aufzunehmen, so kann doch trotz gleicher Leistung bei der Absenkung der Nmin-Werte in der Bodenschicht bis 0,9 m Tiefe ein Vorteil durch den Anbau von Pflanzen mit tiefgehendem Wurzelsystem, wie z.B. Kreuzblütler oder Spitzwegerich, bestehen: Winterzwischenfrüchte mit tief reichenden Wurzelsystemen könnten neben dem im Herbst mineralisierten Stickstoff auch solchen Stickstoff binden, der schon vor dem Anbau einer Winterzwischenfrucht in tiefere Bodenschichten verlagert wurde. Kristensen & Thorup-Kristensen (2004) verglichen die Stickstoff-Aufnahme von Roggen, Weidelgras und Futterrettich und fanden steigende Stickstoff-Aufnahmen der Pflanzen mit zunehmender Tiefe, in die die Wurzeln vorgedrungen waren. Da erst eine weitere Verlagerung von Stickstoff in eine Tiefe, in die keine Wurzeln mehr vordringen, den endgültigen Verlust des

---

Stickstoffs aus dem System bedeuten (Thorup-Kristensen 2006), könnte dieser Stickstoff durch tief wurzelnde Pflanzen noch gebunden werden.

Somit sollte bei einer Bewertung der Winterzwischenfrüchte hinsichtlich der Stickstoffbindungsleistung zusätzlich zur Betrachtung der Nmin-Werte bis 90 cm Tiefe, die Aufnahmefähigkeit der Pflanzen tief im Bodenraum befindlichen Stickstoffs berücksichtigt werden. Thorup-Kristensen (2006) postuliert Fruchtfolgen derart zu gestalten, dass tiefwurzelnde und flachwurzelnde Pflanzen gezielt hinsichtlich ihrer Fähigkeiten Stickstoff aus tiefen Bodenschichten aufzunehmen, kombiniert werden. Pedersen et al. (2009) fanden nach einer Modell-Berechnung heraus, dass die Vorfruchtwirkung einer Winterbegrünung unter anderem von Wurzelsystem der nachfolgenden Hauptkultur abhängig ist und bestätigen die Wechselwirkungen zwischen Winterzwischenfrüchten und Hauptfrüchten.

Die Analyse des Wurzelwachstums in der hier vorgestellten Untersuchung bezog sich auf eine maximale Tiefe von 0,6 m. Aussagen über die tatsächliche Wurzeltiefe der Winterzwischenfrüchte können daher aus diesen Erhebungen nicht getroffen werden.

### 4.3.3 Wurzelmasse

Beide am Versuch beteiligten Kräuter zeigten schon im Dezember hohe Wurzelmassen. Insbesondere Wegwarte verwendete bereits in der Jugendphase viele Assimilate zum Aufbau von Wurzelmasse. So war zum Dezember die Wurzel-Trockenmasse (24,6 dt TM ha<sup>-1</sup> im Jahr 2006 bzw. 14,9 dt TM ha<sup>-1</sup> im Jahr 2007) deutlich höher als die Spross-Trockenmasse (8,4 dt TM ha<sup>-1</sup> bzw. 7,5 dt TM ha<sup>-1</sup>). Diese Relation mit geringerer Spross-Trockenmasse als Wurzel-Trockenmasse wurde sonst nur bei Gelbem Steinklee gefunden, allerdings waren die Trockenmasse-Erträge bei Gelbem Steinklee sehr viel geringer.

Anders als Wegwarte und Gelber Steinklee zeigten die Getreide-Varianten sehr geringe Wurzel-Trockenmasse denen zwar ebenfalls geringe Spross-Trockenmasse gegenüberstanden, jedoch war bei dieser Pflanzengruppe das Spross-Wurzel-Verhältnis mit 2 (Winterroggen, Sorte „Recrut“) bis 7 (Wintertriticale) insgesamt recht weit. Dieses bedeutet, dass die Getreide-Varianten mehr Assimilate in den Sprossaufbau investieren als in das Wurzelsystem. Am Beispiel von Wegwarte und Getreide wird deutlich, dass es pflanzentypische Präferenzen gibt, entweder zunächst das Wurzelsystem oder den Spross aufzubauen.

Aus den gewonnenen Daten zeichnet sich eine Tendenz zur schnelleren Bildung von Wurzelmasse im Verhältnis zur Sprossmasse von Getreide < Futtergrasarten < Kreuzblütler ab. Dieser Abfolge widersprechen Ergebnissen von van Dam & Leffelaar (1998) die

berichten, dass Futterrettich relativ weniger Biomasse als Roggen in die Bildung von Wurzeln als in den Spross investiert. Möglicherweise hat der Saatzeitpunkt des Roggens in eigenen Versuche einen Einfluss gehabt; die hohe Wurzelmasse des früh gesäten Gemenges aus Wicken und Roggen, die deutlich höher als Wicken in Reinsaat war, deutet an, dass Roggen bei früher Aussaat - wie hier im Gemenge - höhere Wurzelmassen produziert als bei später Aussaat wie dies in den Roggenreinsaaten der Fall war. Einen Einfluss des Saattermins auf die Wurzelmasse von Zwischenfrüchten bestätigt Slapunov (1982 zitiert aus Klimanek 1987). Er fand deutlich geringere Wurzelmassen bei nur einwöchiger Verzögerung der Aussaat.

Im Zuge der weiteren Entwicklung der Pflanzenbestände bis zum Mai nahmen auch die Wurzelmassen erheblich zu, allerdings wurden die größten Wurzel-TM nicht bei den Varianten gefunden, die die höchsten Biomasseerträge erbrachten. So sind im Mai 2007 die gefundenen Wurzelmassen der Getreide-Varianten nur etwa halb so groß wie die Wurzelmasse der Weidelgras-Varianten, obwohl der oberirdische Biomasseertrag der Getreide-Varianten leicht über den Erträgen der Weidelgras-Varianten lag. Der Vergleich der Getreide-Varianten mit den Kreuzblütlern zeigt, dass bei etwa gleicher Wurzel-TM der beiden Pflanzengruppen, die Getreide-Varianten dennoch deutlich höhere Sprosserträge bilden konnten.

Betrachtet man die Spross- und Wurzel-TM innerhalb der Pflanzengruppen im Mai 2007, so fällt auf, dass die Kreuzblütler-Varianten mit den höchsten Wurzeleerträgen in der Regel auch die höchsten Sprosserträge unter den Kreuzblütlern erbrachten ( $r = 0,73$ ;  $p < 0,001$ ;  $n = 24$ ). Diese Beobachtung konnte in etwas geringerem Maße auch innerhalb der Gruppe der Wintergetreide ( $r = 0,42$ ;  $p < 0,05$ ;  $n = 36$ ) und der Futtergrasarten ( $r = 0,24$ ; n. s.;  $n = 16$ ) bestätigt werden. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Pflanzenarten zur Produktion hoher Biomasseerträge nicht zwingend eine hohe Wurzel-TM benötigen, dass aber innerhalb der Pflanzengruppen ein gleich gerichteter Zusammenhang zwischen Wurzelmasse und Sprossmasse vorhanden ist.

Diese Beobachtung konnte im Mai des zweiten Versuchsjahres nur zum Teil bestätigt werden; ebenfalls war die Relation von Spross-Trockenmasse zur Wurzel-Trockenmasse der Futtergrasarten < Kreuzblütler < Getreide, allerdings war der Trend, dass innerhalb der Pflanzengruppe eine hohe Wurzel-Trockenmasse häufig einer hohen Spross-Trockenmasse gegenüberstand, weniger deutlich erkennbar.

Bei den Gemenge-Varianten lagen die Wurzel-Erträge in der Regel auf einem ähnlichen Niveau wie bei den am Gemenge beteiligten Prüfgliedern in Reinsaat, mit Ausnahme des Gemenges aus Wicken und Roggen, dessen Wurzel-Trockenmasse deutlich höher als bei Zottelwicken und Roggen in Reinsaat lag. Diese Auffälligkeit ist vermutlich durch die unterschiedlichen Aussaatzeiten von Roggen in Reinsaat (späte Aussaat) und dem Gemenge aus Wicken und Roggen (frühe Aussaat) und der damit verbundenen längeren Vegetationsdauer zu begründen.

---

## 4.4 Nmin-Werte

Im Dezember beider Versuchsjahre konnten etliche Winterzwischenfrucht-Varianten eine deutliche Absenkung der Nmin-Werte herbeiführen. Als besonders leistungsstark erwiesen sich in beiden Versuchsjahren die Kreuzblütler. So zeigten alle Varianten mit Kreuzblütlern sehr geringe Nmin-Werte im Dezember von unter 20 kg Nmin ha<sup>-1</sup>. Grundsätzlich waren Vergleiche zu diesem Termin jedoch schwierig, weil die Streuung innerhalb der Varianten groß war.

In der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Absenkung der Nmin-Werte im Herbst galt die Reihenfolge: Kreuzblütler ≥ Futtergrasarten > Kräuter = kleinkörnige Leguminosen > Getreide. Damit entsprach die Rangfolge derjenigen, die auch hinsichtlich der oberirdischen Biomasse im Dezember galt und wie sie auch bei den Stickstoffmengen in der Sprossmasse beschrieben wurde. Diese Parallele bedeutet, dass die Varianten mit hohem Sprosswachstum eine besonders deutliche Absenkung der Nmin-Werte herbeiführten. Thorup-Kristensen (2001) begründet diesen Zusammenhang zwischen der Aufnahme von Stickstoff und der Bildung von Sprossmasse damit, dass nur dann Stickstoff aufgenommen werden kann, wenn auch Pflanzenmasse zur Verfügung steht in welche der Stickstoff eingebaut werden kann.

Mit der ähnlichen Abfolge bei der Absenkung des Nmin-Wertes: Kreuzblütler > Futtergrasarten > Leguminosen bestätigen Eichler et al. (2004) die vorgestellten Daten. König (1996) untersuchte die Nitrataufnahme von Winterzwischenfrüchten und ermittelte die Reihenfolge Raps > Gemenge Wicken/Roggen > Persischer Klee > Gemenge Erbsen/Hafer > Grobleguminosen und bestätigt damit ebenfalls die Leistungsstärke des Kreuzblütler und die Schwäche der großkörnigen Leguminosen wie sie im eigenen Versuch gefunden wurde. Ferner bestätigt König (1996) die höhere Nitrataufnahme der kleinkörnigen Leguminose (Persischer Klee) gegenüber der großkörnigen Leguminosen (Gemenge Winterackerbohnen/Lupinen/Wicken/Erbsen). Kristensen & Thorup-Kristensen (2004) untersuchten Weidelgras, Roggen und Futterrettich als Winterzwischenfrüchte und fanden ebenfalls die geringsten Nmin-Werte unter Kreuzblütlern. Jedoch konnten sie keine Korrelation zwischen Nmin-Wert und Sprossmasse nachweisen. Obwohl auch dort Winterroggen eine signifikant geringere Sprossmasse produziert hatte, konnte dieser Winterroggen den Nmin-Wert stärker absenken als Weidelgras. Allerdings wurden die geprüften Varianten bereits Anfang August gesät, auf Winterfestigkeit wurde hier nicht geachtet, da der Anbau nur zur Bindung des mineralisierten Stickstoffs vor dem Winter erfolgte. Bei früher Aussaat scheint Roggen eine günstige Wirkung auf den Nmin-Wert zu zeigen - auch bei geringerer Biomasseproduktion. Möglicherweise ist dies durch höhere Stickstoffgehalte der Getreide-Varianten, wie sie auch im eigenen Versuch gefunden und beschrieben wurden, möglich.

---

Im eigenen Versuch konnten die Wintergetreide-Varianten keine Absenkung der Nmin-Werte herbeiführen. Im ersten Versuchsjahr wurde ein leichter Anstieg der Nmin-Werte zum Dezember festgestellt. In der Spross- und Wurzelmasse der Getreide-Varianten wurden etwa 20 bis 30 kg N ha<sup>-1</sup> gemessen; folglich hat das Wintergetreide dem Boden zwar Stickstoff entzogen, jedoch war die Stickstoff-Nachlieferung des Bodens hier offensichtlich größer als die Stickstoff-Aufnahme durch die Pflanzen. Diese Beobachtung mit steigenden Nmin-Werten trotz Anbau einer Winterzwischenfrucht, wurde allein im ersten Versuchsjahr, mit den bereits genannten überdurchschnittlich hohen Temperaturen und der dadurch geförderten Stickstoffmineralisation, gemacht. Dies zeigt, dass die Leistung der Getreide-Varianten hier nicht ausreichend war um die Mineralisation zu kompensieren.

Hinsichtlich des Anbaus von Getreide zur Verminderung der Nmin-Werte bleibt festzuhalten, dass die im September gesäten Getreide-Varianten des ersten, überdurchschnittlich warmen Versuchsjahres keine Nmin-Absenkung bewirkten. Außerdem konnten die verspätet gesäten Wintergetreide-Varianten im zweiten Versuchsjahr hinsichtlich der Nmin-Absenkung ebenfalls kaum Vorteile gegenüber der Schwarzbrache offenbaren. Somit konnte die Pflanzengruppe der Getreide-Varianten zur Stickstoffkonservierung nur wenig beitragen.

Auch Rodrigues et al. (2002) überprüften die Leistungsfähigkeit von Getreide zur Stickstoffkonservierung im Herbst und Frühwinter durch den Anbau von Triticale und stellten fest, dass hohe Nitrat-Werte im Boden nicht zu hohen Stickstoffmengen im Spross führten. Sie erklärten die begrenzte Stickstoff-Aufnahme mit der geringen vegetativen Entwicklung des Getreides im Herbst und Winter.

Hingegen berichten Brandi-Dohrn et al. (1997) von einem Versuch, bei dem Roggen als Winterzwischenfrucht nach Mais oder Broccoli angebaut wurde und die Nitrat-Auswaschung deutlich (um bis zu 34 kg N ha<sup>-1</sup>) reduziert werden konnte. Eine deutliche Absenkung der Nitratmenge im Boden durch den Anbau von Roggen oder Hafer im Herbst bestätigt auch Thorup-Kristensen (2001).

Es muss allerdings wiederum an die pflanzenbaulichen Erfahrungswerte zur termingerechten Aussaat erinnert werden, da die Pflanzen im vorgestellten Versuch nicht allein zur Vermeidung von Stickstoffverlagerungen angebaut wurden, sondern sicher überwintern und hohe Biomasseerträge erbringen sollten. Hier zeigt sich beim Anbau von Getreide die Schwierigkeit, dass die Maximierung der Stickstoff-Aufnahme bei einigen Varianten in Konflikt geraten kann mit der gesicherten Überwinterung und der nachfolgenden Produktion von ansehnlicher Biomasse.

Auch einige der kleinkörnigen Leguminosen vermochten es, den Nmin-Wert zum Dezember abzusenken; besonders erfolgreich waren Zottelwicken (-42 kg Nmin ha<sup>-1</sup>) und Inkar-

natklee ( $-29 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$ ). Unterstellt man, dass in der Zeit vom September bis Dezember weitere Mineralisation stattgefunden hat, worauf neben der bereits genannten warmen Witterung auch der gestiegene Nmin-Wert der Schwarzbrache hinweist. Wenn weiter unterstellt wird, dass keine Stickstoff-Verlagerung stattfand, so liegt der Schluss nahe, dass die Stickstoffaufnahme der feinkörnigen Leguminosen aus dem Boden noch um den Betrag der Mineralisation höher war, als der Betrag um den der Nmin-Wert von September bis Dezember verändert wurde. Der Nmin-Wert der Schwarzbrache stieg in diesem Zeitraum um etwa  $30 \text{ kg N ha}^{-1}$ , diese Menge dürfte der mineralisierten Menge in dieser Zeitspanne mindestens entsprechen. Zu den 42 bzw. 29  $\text{kg N ha}^{-1}$  um die der Nmin-Wert der feinkörnigen Leguminosen gesunken ist, kommt folglich ein Betrag, der bei etwa  $30 \text{ kg N ha}^{-1}$  liegt, hinzu. Demzufolge sind etwa 70 bzw. 60  $\text{kg N ha}^{-1}$  aus der Bodenlösung aufgenommen worden. Die Stickstoffmengen in der Wurzel- und Spross-TM der genannten Varianten lagen bei 68 bzw. 80  $\text{kg N ha}^{-1}$ . Das bedeutet, laut dieser Abschätzung ist der Großteil des sprossgebundenen Stickstoffs aus der Bodenlösung aufgenommen worden, während die Fixierung von luftbürtigem Stickstoff demnach noch sehr gering war. Dies widerspricht der Vermutung, Leguminosen seien zur Absenkung der Nmin-Werte generell ungeeignet, da sie aufgrund ihrer Stickstoffautonomie den Stickstoff aus der Bodenlösung nicht unbedingt benötigen und ihn deswegen nicht aufnehmen.

Eine Nmin-Absenkung durch feinkörnige Leguminosen bestätigen Schertz & Miller (1972), die beim Anbau von Luzerne ein Absinken der Nitratwerte im Boden feststellen konnten. Vyn et al. (2000) beobachteten die gleiche Effektivität in der Absenkung der Nitrat-Konzentration im Boden als sie Rotklee, Roggen oder Ölrettich als Zwischenfrüchte nach Weizen anbauten. Auch Askegaard & Eriksen (2008) bestätigen die Tauglichkeit von feinkörnigen Leguminosen zur Nmin-Absenkung. Sie fanden eine signifikante Verringerung der Stickstoffverlagerung im Herbst durch den Anbau eines Gemenges aus Rot- und Weißklee gegenüber einer Schwarzbrache.

Deutlich anders verhielt sich die Entwicklung der Nmin-Werte bei den feinkörnigen Leguminosen. Hier war bei den Nmin-Beprobungen im Dezember und März in beiden Versuchsjahren kein nennenswerter Unterschied zur Schwarzbrache zu verzeichnen, sodass die im Versuch geprüften feinkörnigen Leguminosen für die Absenkung der Nmin-Werte als ungeeignet zu betrachten sind. Die geringe Leistungsfähigkeit von feinkörnigen Leguminosen (Wintererbsen) bezüglich der Nmin-Absenkung bestätigen Eichler et al. (2004).

Möglicherweise hat der gewählte, späte Saattermin der feinkörnigen Leguminosen im beschriebenen Versuch zu mangelhafter Pflanzenentwicklung und Nährstoffaufnahme geführt; andererseits sollte mit der Wahl des späten Saattermins Rücksicht auf die geringere Winterhärte der feinkörnigen Leguminosen genommen werden und ein allzu umfangreiches Sprosswachstum unterbleiben.

Begünstigt wurde im vorgestellten Versuch die Stickstoffaufnahme der früh gesäten, feinkörnigen Leguminosen aus dem Boden vermutlich durch die hohen Nmin-Werte im Boden, da insbesondere Nitrat im Boden die Fixierleistung der Rhizobien behindert (Dean & Clark 1980; Wong 1980). Der hohe Nitratgehalt könnte somit die Aufnahme von Stickstoff direkt, aufgrund seiner guten Verfügbarkeit, und indirekt durch eine Behinderung der Rhizobientätigkeit erhöht haben. Die Beobachtung steigender Stickstoffaufnahmen der Leguminosen über die Wurzeln bei zunehmendem Stickstoffangebot im Boden beschreiben auch Torbert et al. (1996).

Im Dezember 2007 stellte sich die Stickstoff-Situation insgesamt anders dar als im Dezember des ersten Versuchsjahres; es waren die Nmin-Werte aller Varianten gesunken. Allerdings waren auch im zweiten Jahr schwächere Leistungen der Wintergetreide-Varianten und der feinkörnigen Leguminosen zu erkennen. So war bei den Getreide-Varianten der Betrag um den sich der Nmin-Wert im Boden von September bis Dezember 2007 verminderte, größer als die Summe Stickstoffs, die in Spross und Wurzel gemessen wurde; hier ist demzufolge ein Teil des mineralisierten Bodenstickstoffs nicht in die Pflanzen gelangt, sondern es ist ein Stickstoffverlust aufgetreten. Sollte in der genannten Zeitspanne durch Mineralisation weiterer Stickstoff in die Bodenlösung gelangt sein ist dieser noch als zusätzlicher Verlust hinzuzurechnen. Die Schwarzbrache zeigte im Dezember 2007 ebenfalls geringere Nmin-Werte als im September; dies bedeutet, dass auch bei der Schwarzbrache ein Stickstoffverlust zu verzeichnen war.

Betrachtet man die Werte des mineralisierten Stickstoffs der drei untersuchten Bodenschichten im Dezember 2007 (Abbildung 19), so fallen die zum Teil sehr geringen Nmin-Werte in der unteren Bodenschicht von 60 cm bis 90 cm auf. Es erscheint fraglich, ob die flach wurzelnden Weidelgras-Varianten die Absenkung der Nmin-Werte in dieser Zone durch Aufnahme über die Wurzel leisten konnten. Wahrscheinlich sind hier während der Jugendphase der Pflanzen geringe Mengen mineralisierten Stickstoffs in tiefere Bereiche als 90 cm Tiefe verlagert worden, wodurch die Nmin-Werte der Schicht 60 bis 90 cm vermindert wurden. Wenn gleichzeitig kein neuer Stickstoff aus den darüber liegenden Bodenschichten folgte, weil mit fortschreitendem Aufwuchs der Pflanzen eine Aufnahme durch deren Wurzeln erfolgt war, könnte dies die geringen Werte der Bodenschicht von 60 bis 90 cm Tiefe erklären.

Die geprüften Gemenge verhielten sich hinsichtlich der Nmin-Absenkung in ähnlicher Weise wie die entsprechenden Pflanzen in Reinsaat. So lagen das Gemenge aus Ackerbohnen und Erbsen auf dem Niveau der beiden Arten in Reinsaat, das Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich entsprach Triticale in Reinsaat, die beiden Gemenge mit Kreuzblütlern konnten den Nmin-Wert ebenso gut absenken wie die Kreuzblüter in Reinsaat. Landsberger Gemenge war Welschem Weidelgras ebenbürtig und senkte den Nmin-Wert stärker ab, als die beiden am Gemenge beteiligten Leguminosen Zottelwicken und Inkarnatklee, in Reinsaat. Das Gemenge aus Wicken und Roggen senkte den Nmin-Wert stärker als Wicken oder Roggen in Reinsaat.

---

Der Anbau von Gemengen, insbesondere der Anbau von Landsberger Gemenge oder dem Gemenge aus Wicken und Roggen bedeutet folglich, dass durch die gezielte Kombination mehrerer Pflanzenarten eine wirksame Nmin-Absenkung möglich ist und außerdem Höchsterträge bei der Ernte der Biomasse erreicht werden können.

Auch Ranells & Wagger (1997) überprüften die Nmin-Absenkung von Leguminosen und Nicht-Leguminosen in Reinsaat und Gemenge. Sie bauten Gemenge aus Wicken und Roggen sowie aus Roggen und Inkarnatklée an und fanden deutlich stärkere Nmin-Absenkungen der genannten Gemenge als bei den geprüften Leguminosen in Reinsaat. An einigen Terminen waren die Nmin-Werte der Leguminosen/Nicht-Leguminosen Gemenge sogar geringer als von der Nicht-Leguminose (Roggen) in Reinsaat (nicht signifikant). Ranells & Wagger (1997) bestätigen durch diese Ergebnisse die erhebliche Stickstoff-Konservierungsleistung der Gemenge, insbesondere auch der Gemenge legumer mit nichtlegumen Partnern.

Die recht hohen Nmin-Werte des Gemenges aus Triticale und Spitzwegerich, die deutlich über den Werten des Spitzwegerichs lagen, sind vermutlich darin begründet, dass dieses Gemenge zum späteren Saatzeitpunkt gesät wurde. Hier konnte der Spitzwegerich seine Möglichkeiten zur Nmin-Absenkung, die er in Reinsaat bei frühem Saattermin zeigte, nun aufgrund der verkürzten Wachstumszeit nicht mehr realisieren. Dies zeigt erneut, dass der Saattermin für die wirksame Absenkung des Nmin-Wertes eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung hat, während für die Erzielung hoher Biomasseerträge im Mai auch die späte Aussaat bei den Getreidevarianten kein Nachteil war. Darum sollten die Pflanzen zur Sicherstellung einer wirkungsvollen Nmin-Absenkung früh gesät werden. Diese Bedingung wird auch bei der Betrachtung der Wintergetreide-Varianten deutlich, die aufgrund der verspäteten Aussaat im zweiten Versuchsjahr nochmals weniger Stickstoff binden konnten als im ersten Versuchsjahr.

Vom Dezember zum März beider Versuchsjahre waren die Nmin-Werte aller Varianten deutlich abgesunken. So wurde bei den Nicht-Leguminosen Nmin-Werte von 12 kg Nmin ha<sup>-1</sup> bis 35 kg Nmin ha<sup>-1</sup> gemessen und lediglich die Wintergerstensorte „Dorothea“ lag mit 47 kg Nmin ha<sup>-1</sup> im ersten Versuchsjahr darüber. Hingegen lagen die Nmin-Werte der großkörnigen Leguminosen über den Werten der Nicht-Leguminosen.

Der Vergleich der Nmin-Werte mit den Stickstoffmengen, die im Spross der Nicht-Leguminosen zum Erntetermin März gemessen wurden, lässt vermuten, dass die Absenkung der Nmin-Werte durch Aufnahme in den Spross begründet werden konnte. Hingegen ist die sprossgebundene Stickstoffmenge der großkörnigen Leguminosen sowie von Triticale und der Wintergerstensorte „Dorothea“, insbesondere im ersten Versuchsjahr, um einen geringeren Betrag angestiegen als der Betrag um den die Nmin-Werte sich verminderten. Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass ein Teil des Stickstoffes im Spross der Leguminosen eventuell durch Stickstofffixierung aus der Luft gewonnen wur-

de. Dies lässt vermuten, dass während der Zeit vom Dezember bis zum März bei den großkörnigen Leguminosen sowie Triticale und Wintergerste (Sorte „Dorothea“) eine Stickstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten - tiefer als die beprobte Tiefe bis 0,90 m - stattgefunden hat. Die deutlich höheren N<sub>min</sub>-Werte in der Bodenschicht von 60 bis 90 cm Tiefe (Abbildung 16) sprechen ebenfalls für eine Verlagerung von Stickstoff aus den oberen Bodenschichten.

Auffällig geringe N<sub>min</sub>-Werte zeigte die Gerstensorte „Dorothea“ zum Mai 2007 (Abbildung 18). Wie bereits angesprochen, zeigte diese Sorte insbesondere im ersten Versuchsjahr (Mai 2007), deutlich weniger Stickstoff in der Sprossmasse sowie weniger Stickstoff in der Wurzelmasse als die anderen Getreide-Varianten (Tabelle 23). Jedoch ist bei dieser Variante der N<sub>min</sub>-Wert auf dem gleichen niedrigen Niveau aller übrigen Getreide-Varianten. Dies bedeutet, dass hier vermutlich ein leichter Verlust an mineralisiertem Stickstoff aufgetreten ist.

Durch den Anbau von Kreuzblütlern, Futtergrasarten, Kräutern, feinkörnigen Leguminosen sowie einigen Gemenge aus diesen Pflanzengruppen kann eine beachtliche Absenkung der N<sub>min</sub>-Werte im Herbst realisiert werden. Vergleicht man hingegen die N<sub>min</sub>-Werte von Wintergetreide, Ackerbohnen und Erbsen mit den N<sub>min</sub>-Werten der Schwarzbrache, so wird deutlich, dass der Anbau dieser Kulturen im vorgestellten Versuch keine stickstoffkonservierende Maßnahme darstellte.

## 4.5 Sprossmasse des Energiemaises

Insgesamt war das Ertragsniveau des Maises im zweiten Versuchsjahr geringer als im ersten Versuchsjahr. Eine Ursache könnte in der verzögerten Keimung des Maises im zweiten Versuchsjahr liegen. Während im ersten Versuchsjahr aufgrund der Niederschläge, die deutlich oberhalb des langjährigen Mittels lagen (Abbildung 1) stets ausreichend Wasser verfügbar war, gab es im zweiten Versuchsjahr aufgrund geringerer Niederschläge eine Wassermangelsituation, die zu verzögerter Keimung führte (Reineke 2009). Der verspätete Wachstumsbeginn kann dazu beigetragen haben, dass der Mais ungleiche Ertragsleistungen in den beiden Versuchsjahren aufwies.

Die Rangfolge der Energiemaiserträge nach dem Anbau von Winterzwischenfrüchten verschiedener Pflanzengruppen war in beiden Jahren gleich; es war Schwarzbrache > Leguminosen > Kreuzblütler > Getreide > Kräuter > Futtergras-Varianten. Da es in beiden Jahren, bis auf einen Zeitraum zu Beginn des Maiswachstums im zweiten Versuchsjahr, ausreichende Niederschläge (Abbildung 1) gab und aufgrund der Bodenuntersuchungen (Tabelle 1) von einer ausreichenden Versorgung mit Makronährstoffen ausgegangen werden kann, sind vermutlich unterschiedlich hohe Verfügbarkeiten von Stickstoff die Ursache für die Ertragsdifferenzen. Hierfür spricht der hohe Ertrag des Energiemaises

nach der Schwarzbrache. Die N<sub>min</sub>-Werte im Mai eines jeden Jahres waren nach der Schwarzbrache hoch. Hier könnte die Menge mineralischen Stickstoffs, die besonders in der oberen Bodenschicht von 0 cm bis 30 cm Bodentiefe deutlich höher war als bei den übrigen Varianten (Abbildung 18 und Abbildung 22), dem Mais zu einer zügigen Anfangsentwicklung verholfen haben. Diese Vermutung wird bestärkt durch die Beobachtung höherer N<sub>min</sub>-Werte im Mai 2008 in der oberen Bodenschicht auch bei den Zottelwicken; nach dieser Variante erbrachte der Energiemais im zweiten Versuchsjahr den höchsten Ertrag.

Andererseits gab es auch Ertragsdifferenzen zwischen Varianten, deren N<sub>min</sub>-Werte im Mai etwa gleich groß waren. So erbrachte Mais im zweiten Versuchsjahr nach Rotklee einen deutlich höheren Ertrag als nach Triticale (135 dt TM ha<sup>-1</sup> bzw. 86 dt TM ha<sup>-1</sup> Tabelle 31) während die N<sub>min</sub>-Werte mit 16,7 kg N ha<sup>-1</sup> bzw. 16,4 kg N ha<sup>-1</sup> (Abbildung 22) etwa gleichauf lagen. Daher ist es nahe liegend, dass nicht allein die Menge mineralisierten Stickstoffs zur Aussaat der Zweitkultur Mais bedeutsam war, sondern während der weiteren Entwicklung dem Mais unterschiedlich große Stickstoffmengen zur Verfügung standen.

Der Anbau von Winterzwischenfrüchten zur Konservierung des Bodenstickstoffs und deren Verwendung als Nährstofflieferant für nachfolgende Sommerungen, wird in der Literatur häufig beschrieben (Holderbaum et al. 1990, Power et al. 1991, Dou et al. 1994, Ranells & Wagger 1997, Kuo & Jellum 2000). Bei diesen Arbeiten wurde der oberirdische Aufwuchs der Winterzwischenfrüchte nicht wie im eigenen Versuch vom Feld abtransportiert, sondern eingearbeitet oder als Mulchschicht auf den Flächen belassen. Folglich besteht ein großer Unterschied zu den hier vorgestellten Untersuchungen und es lassen sich aus den beschriebenen Vorfruchteffekten dieser Arbeiten nur begrenzt Parallelen zu den eigenen Daten aufzeigen.

Ranells & Wagger (1996) ermittelten eine mittlere Stickstofffreisetzung verschiedener Winterzwischenfrüchte, die bei 24 kg N ha<sup>-1</sup> bis 132 kg N ha<sup>-1</sup> acht Wochen nach der Einarbeitung lag. Wagger (1989) konnte eine Nutzung von 30% bis 36% des Stickstoffs aus legumen Winterzwischenfrüchten durch nachgebauten Mais ermitteln. Dou et al. (1994) fanden heraus, dass beim Einsatz von legumen Gründüngungspflanzen bereits vier Wochen nach deren Einarbeitung 80% der maximalen Stickstoffmengen pflanzenverfügbar waren und daran anschließend eine Phase geringerer Stickstoff-Mineralisation folgte. Frankenberger & Abdelmagid (1985) berichten ebenfalls über eine Stickstoff-Mineralisation aus Pflanzenresten von Leguminosen von bis zu 76% und ergänzten, dass der Umfang der Freisetzung sehr eng korreliert ist mit dem C/N-Verhältnis des Ausgangsmaterials.

Im vorgestellten Versuch wies die Wurzelmasse im Mai (Tabelle 22) weite C/N-Verhältnisse bis zum Teil über 60 bei den Nicht-Leguminosen auf, während die Leguminosen engere C/N-Verhältnisse von etwa 20 zeigten. Die genannte Dimension der C/N-

---

Werte wird von Kuo et al. (1997a) bestätigt. Sie berichten von C/N-Werten in der Wurzelbiomasse von Roggen, Weidelgras, Raps und Zottelwicken die 62, 75, 76 bzw. 24 betragen. Geringe C/N-Werte der Wurzeln von Leguminosen (von 14 bis 34) nennen auch Frankenberger & Abdelmagid (1985).

Das C/N-Verhältnis der Wurzeln im vorgestellten Versuch könnte auch die Erklärung für das geringe Ertragsniveau des Energiemaies nach dem Anbau der Weidelgras-Varianten, insbesondere des Deutschen Weidelgrases, liefern. Die gespeicherte Stickstoffmenge der Wurzeln lag im Mai beider Versuchsjahre etwa auf dem Niveau der Leguminosen (Tabelle 23). Die Wurzelmasse der Weidelgras-Varianten hatte jedoch ein sehr weites C/N-Verhältnis. Gleichzeitig zeigten die Weidelgras-Varianten die größte Wurzel-TM im Mai in beiden Versuchsjahren. Dies lässt vermuten, dass es hier zu einer Stickstoff-Immobilisierung gekommen ist und der Stickstoff aus den Wurzelresten dem Mais somit nicht zur Verfügung stand. Diese Beobachtung machten auch Francis et al. (1998). Sie bauten Nicht-Leguminosen als Winterzwischenfrüchte vor Sommergetreide an und bestätigen eine Ertragsdepression im Vergleich zum Anbau nach Schwarzbrache, wenn große Mengen an Biomasse in den Boden eingebracht wurden.

Ebenfalls ein weites C/N-Verhältnis der Wurzelbiomasse zeigten die Kreuzblütler, diese waren jedoch nach den Leguminosen die günstigsten Vorfrüchte für den Energiemais. Bei den Kreuzblütlern wurden im Vergleich zu den Weidelgras-Varianten deutlich geringere Wurzeltrockenmassen im Mai festgestellt. Hier wurde vermutlich gleichfalls zunächst mineralisierter Stickstoff immobilisiert, jedoch dauerte aufgrund der geringeren Wurzelmassen diese Phase wahrscheinlich nicht so lange an und es kam zu einer Netto-Mineralisation, die der Maiskultur Stickstoff zur Verfügung stellte. Eine weitere Ursache unterschiedlicher Stickstoffnachlieferung könnte in der heterogenen Verteilung der Wurzelmassen der Kreuzblütler liegen. Während die Pfahlwurzeln der Kreuzblütler eine größere Tiefe durchdrangen und sich demzufolge auf ein größeres Bodenvolumen verteilten, befanden sich die Wurzeln der Weidelgras-Varianten überwiegend im oberen Bodenbereich. Diese Akkumulation von Wurzelmaterial kann zu zusätzlichen Erschwernissen und Verzögerungen beim bakteriellen Abbau geführt haben und eine Mangelsituation für den Mais, insbesondere in der Jugendphase, in der das Wurzelsystem des Maises noch nicht in tiefere Bodenschichten vordringen konnte, nach sich gezogen haben.

Die höchsten Maiserträge wurden nach dem Anbau von den Winterzwischenfrüchten erzielt, bei denen die C/N-Beziehung in der Wurzelbiomasse eng war. Engste C/N-Verhältnisse in der Wurzel-TM des vorgestellten Versuches wurden bei der Gruppe der Leguminosen mit Werten von 18 bis 21 gemessen; lediglich Gelber Steinklee lag mit 27 leicht darüber. Aus den Ergebnissen wird somit ersichtlich, dass ein sinkendes C/N-Verhältnis der Wurzeln von Winterzwischenfrüchten zu steigenden Maiserträgen führte.

Eine zunehmende Stickstoffmineralisation bei sinkenden Werten des C/N-Verhältnisses bestätigt Enwezor (1976), der die Stickstoffmineralisation nach Einarbeitung verschiede-

---

ner Gemenge aus gemahlenem Getreidestroh und Erbsen untersuchte. Er stellte außerdem fest, dass in seinem Versuch die Schwelle ab der eine Immobilisierung erfolgt und die Netto-Mineralisierung stattfindet zwischen den C/N-Werten von 23,8 und 16,1 lag. Bauemer (1978) nennt den Wert 25, ab dessen Überschreitung eine biologische Stickstoffsperre einsetzt.

Die Bedeutung der C/N-Werte bei der Umsetzung von eingearbeiteter Biomasse in den Boden bestätigen auch Gutser & Vilsmeier (1985), die mit der Einarbeitung von Sprossmasse in den Boden experimentierten. Frankenberger & Abdelmagid (1985), Janzen & Kucey (1988) sowie Honeycutt & Potaro (1990) bestätigen ebenfalls den beschleunigten Abbau organischer Masse mit engem C/N-Verhältnis. Fox et al. (1990) und Wagger (1989a) betonen, dass neben dem C/N-Verhältnis auch die Gehalte an Lignin und Polyphenolen den Mineralisationsprozess beeinflussen.

Reents & Möller (2000) und Rinnofner et al. (2006) haben die Auswirkung des Anbaus von Winterzwischenfrüchten legumer und nichtlegumer Art auf den Ertrag der Folgefrucht untersucht. Sie stellten eine Ertragssteigerung fest, die durch den Anbau von Leguminosen tendenziell größer war als durch den Anbau von Leguminosen und Nicht-Leguminosen im Gemenge. Eine bessere Versorgung der Folgefrucht mit Stickstoff durch den Anbau von Leguminosen fanden Ranells & Wagger (1996), die die Stickstofffreisetzung verschiedener Winterzwischenfrüchte untersuchten. Sie fanden eine höhere Stickstofffreisetzung von Zottelwicken und dem Gemenge aus Wicken und Roggen als von Roggen. Höhere Maiserträge nach dem Anbau von Leguminosen bestätigen auch Stute & Posner (1985).

Aufgrund der Ertragsvorteile des Maises nach der Schwarzbrache lässt sich schlussfolgern, dass der Anbau von Winterzwischenfrüchten zu einer Stickstoffmangelsituation der Folgefrucht führte. Dieser Mangel wurde zum einen durch den Einbau von Stickstoff in der Wurzel- und Sprossmasse und anschließendem Abtransport großer Stickstoffmengen mit der Sprossmasse der Winterzwischenfrüchte verursacht. Zum zweiten rief die nachfolgende Stickstoffimmobilisierung durch die Wurzelreste einen Stickstoffmangel hervor, der umso gravierender war, je weiter das C/N-Verhältnis war.

Zum Ausgleich des genannten Stickstoffmangels könnte eine Stickstoffdüngung des Maises mit den in Biogasanlagen anfallenden Gärresten erfolgen. Mokry (2008) untersuchte 249 Gärrest-Proben und fand mittlere Stickstoffgehalte von 4-5 kg N t FM<sup>-1</sup>. Davon lagen ca. 55 – 65% der Stickstoffmenge als Ammonium-Stickstoff vor. Demzufolge liegt bei der Düngung mit Gärresten ein Großteil des gedüngten Stickstoffs in einer direkt pflanzenverfügbaren Form vor, sodass die genannte Stickstoffmangelsituation rasch behoben werden könnte. Als weiterer Aspekt der Gärrestdüngung ist die Auswirkung auf die Humusbilanz zu nennen. Bei der vollständigen Abfuhr des oberirdischen Aufwuchses, wie sie bei der geplanten Nutzung in Biogasanlagen geschieht, werden die Humusbilanzen häufig negativ und könnten durch eine Rückführung von Gärresten ausgeglichen werden (Strauß et

---

al. 2009). Folglich scheint eine Düngung des Maises mit Gärresten in vielerlei Sicht vorteilhaft zu sein.

## 4.6 Methanerträge

### 4.6.1 Spezifischer Methanertrag der Winterzwischenfrüchte

Die in der Literatur angegebenen Daten zur Methanausbeute beziehen sich in der Regel auf die Methanausbeute je Kilogramm organischer Trockenmasse (oTM) des geprüften Gärsubstrates. Da die spezifischen Methanerträge der im vorgestellten Versuch geprüften Varianten hauptsächlich für die Berechnung der Methan-Flächenerträge ermittelt wurden, war es hinreichend, die Methanerträge je kg Trockenmasse zu bestimmen; die weitere Veraschung des Probenmaterials zur Bestimmung der organischen Trockenmasse ist unterblieben. Aus diesem Grund sind die im vorgestellten Versuch ermittelten Werte zum spezifischen Methanertrag nicht unmittelbar mit denen in der Literatur vergleichbar.

Laut Amon et al. (2005) sind die Gehalte an organischer TM landwirtschaftlicher Nutzpflanzen um etwa 6 bis 10% geringer als die angegebene Gesamt-Trockenmasse dieser Pflanzen (eigene Berechnungen aus Daten von Amon et al. 2005). In einer späteren Veröffentlichung nennen Amon et al. (2006) Rohaschegehalte, die je nach physiologischem Entwicklungszustand der untersuchten Getreideproben zwischen 4 und 12% der TM lagen, wobei mit fortschreitender Entwicklung die Rohaschegehalte abnahmen. Herrmann et al. (2007) nennen Gehalte an organischer TM in Prozent der Gesamt-Trockenmasse von einsilierten Nutzpflanzen die zwischen 82% und 95 % schwanken. Gardner et al. (1985) gehen von 8% nichtorganischen Bestandteilen an der Gesamttrockenmasse aus. Dementsprechend werden aufgrund der Bezugsgröße „TM“ statt „oTM“ die im eigenen Versuch dargestellten Werte für den spezifischen Methanertrag stets geringer sein als die in der Literatur angegebenen Werte, da die Menge an organischer Trockenmasse einige Prozent unter der Gesamt-Trockenmasse liegt.

Des Weiteren ist die Vergleichbarkeit der Methanausbeute verschiedener Gärsubstrate abhängig von zahlreichen äußeren Faktoren, wie dem Zerkleinerungsgrad des Substrates (Herrmann et al. 2009) oder der Art der Konservierung (Amon et al. 2010). Hierdurch ergibt sich eine weitere Einschränkung in der Vergleichbarkeit, da diese Informationen in der Regel nicht mit den angegebenen Daten veröffentlicht werden.

Die Berechnung der Methan-Flächenerträge des vorgestellten Versuchs erfolgte durch Multiplikation von Trockenmasse-Erträgen und spezifischen Methanerträgen. Für die Gemenge lagen keine spezifischen Methanerträge vor, hier wurden die spezifischen Methanerträge der am Gemenge beteiligten Arten in Reinsaat mit den entsprechenden Tro-

ckenmasse-Erträgen der am Gemenge beteiligten Arten errechnet, anschließend wurden die Ergebnisse der Gemengepartner aufsummiert. Bei dieser Annäherung werden die Methan-Werte der Gemenge möglicherweise unterschätzt, da es bei der gemeinsamen Vergärung mehrerer Pflanzenarten aufgrund von Synergieeffekten zum Teil zu höheren Methanausbeuten kommen kann als bei der Monofermentation der Substrate (Abdoun & Weiland 2009, Anonymus 2009).

An dieser Stelle sei ergänzt, dass es Überlegungen gibt, den Methanertrag nicht auf der Basis der oTM anzugeben, sondern durch Errechnung der „Fermentierbaren organischen Trockensubstanz“ (FoTS, Weißbach 2009) eine weitere Präzisierung bei der Kennzeichnung des Gasbildungspotenzials einzuführen. Gemäß Weißbach (2009) kann dabei von einem Methanertrag von 420 l Methan je kg FoTS ausgegangen werden.

Die Methanerträge landwirtschaftlicher Nutzpflanzen analysierten Herrmann et al. (2007) im praktischen Gärtest (Batch-Test). Die von ihnen genannten Methanerträge konnten aufgrund der zusätzlich genannten Gehalte an organischer Trockenmasse, ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg oTM}^{-1}$ ) in Methanerträge je kg TM ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$ ) umgerechnet werden. Die so umgeformten Daten von Herrmann et al. (2007) von Deutschem Weidelgras, Grünroggen und Triticale lagen bei 0,307, 0,316 bzw. 0,303  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  und zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Daten des hier vorgestellten Versuches. (vgl. 0,295, 0,307 bzw. 0,309  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  der eigenen Analyse, Tabelle 20). Außerdem ermittelten sie einen spezifischen Methanertrag für die Brassica-Variante Futterrettich von 0,228  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$  und bestätigen ebenfalls die Beobachtung geringerer Methanausbeuten der Kreuzblütler im hier vorgestellten Versuch.

Umfangreiche Daten zur Gasausbeute verschiedener landwirtschaftlicher Nutzpflanzen stellt Keymer (2010) vor. Die Daten sind in Form einer internetgestützten Datenbank abrufbar. Sie sind auf Basis der Analyse von Inhaltsstoffen der eingesetzten Gärsubstrate rechnerisch ermittelt worden.

#### **4.6.2 Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte**

In beiden Versuchsjahren wurde eine signifikante Korrelation zwischen den Trockenmasse-Erträgen der Winterzwischenfrüchte im Mai und den Methan-Flächenerträgen im Mai mit hohen Korrelationskoeffizienten (0,973 im Mai 2007 bzw. 0,983 im Mai 2008,  $n = 136$ ,  $p < 0,01$ ) sichtbar, hingegen gab es keine statistisch signifikante Beziehung zwischen dem spezifischen Methanertrag und dem Methan-Flächenertrag im Mai eines jeden Jahres. Hohe TM-Erträge führten infolgedessen in der Regel zu hohen Methan-Flächenerträgen. Dieses deutet darauf hin, dass die Trockenmasse-Erträge maßgeblich die Methan-Flächenerträge bestimmen, während hohe spezifische Methanerträge die Methan-Flächenerträge weniger stark beeinflussen.

---

Auch Kaiser et al. (2004) und Stickse et al. (2009) weisen darauf hin, dass der Trockenmasse-Ertrag verschiedener Winterzwischenfrüchte und von Mais eine größere Bedeutung für den Methan-Flächenertrag hat als die spezifischen Methanerträge.

Die Berechnungen der Methan-Flächenerträge offenbarten im ersten Versuchsjahr eine deutliche Überlegenheit der Getreide-Varianten (Abbildung 23). Es führten drei der vier geprüften Winterroggensorten die Rangliste bei den Methan-Flächenerträgen an, gefolgt von der Gersten-Variante „Ludmilla“, an dieser schlossen zunächst Landsberger Gemenge und dann wiederum Gemenge mit Getreide-Beteiligung (Triticale/Spitzwegerich und Wicken/Roggen) an. Bei den genannten Varianten führten hohe TM-Erträge bei gleichzeitig hohen spezifischen Methangehalten zu hohen Methan-Flächenerträgen. Getreide ist folglich für die Erzielung hoher Methanerträge besonders geeignet.

Anders als bei Wintergetreide war die Situation z.B. bei Inkarnatklees; hier wurde im ersten Versuchsjahr der zweithöchste TM-Ertrag erzielt, jedoch lag der Methan-Flächenertrag dieser Variante unter den Getreide-Varianten (Tabelle 20). Hier führten die sehr geringeren spezifischen Methanerträgen bei nahezu gleichen Biomasseerträgen zu geringeren Methan-Flächenerträgen als bei den Roggen-Varianten. Hierdurch wird bestätigt, dass zur Produktion hoher Methan-Flächenerträge die hohen Trockenmasse-Erträge eine Voraussetzung sind, den spezifischen Methanerträgen jedoch - wie das Beispiel Inkarnatklees zeigt - ebenfalls eine gewisse Bedeutung zukommt.

Aus den dargestellten Beispielen wurde deutlich, dass der alleinige Vergleich der Trockenmasse-Erträge nicht ausreichend ist um die Leistung der Winterzwischenfrüchte als Biogas-Lieferant zu bewerten. Ohne ausreichende Trockenmasse-Erträge ist sicherlich eine wichtige Voraussetzung für hohe Methan-Flächenerträge nicht gegeben, jedoch können Varianten, die zudem einen hohen spezifischen Methanertrag aufweisen, den Methan-Flächenertrag nochmals deutlich steigern.

#### **4.6.3 Summe der Methan-Flächenerträge aus Winterzwischenfrüchten und Mais**

Aufgrund der geringen TM-Erträge der Winterzwischenfrüchte des zweiten Versuchsjahres wurden in vielen Kombinationen von Winterzwischenfrüchten mit Mais geringere Methan-Flächenerträge erzielt als beim Anbau von Mais ohne vorheriger Winterzwischenfrucht (Schwarzbrache). So zeigten u. a. im zweiten Versuchsjahr alle Kombinationen mit Getreide und Gräsern die genannten geringen Methan-Flächenerträge, während höhere Methan-Flächenerträge als bei Mais nach Schwarzbrache nur durch den vorherigen Anbau von Kreuzblütlern oder Leguminosen (z.T. auch im Gemenge) möglich war. Würde eine Bewertung des Anbaus von Winterzwischenfrüchten allein auf Basis ökonomischer

---

Kriterien erfolgen, so wären in diesem zweiten Versuchsjahr (2007/2008) vermutlich nur wenige Varianten anbauwürdig gewesen.

Eine ökonomische Bewertung von Winterzwischenfrüchten im Zweikulturnutzungssystem stellt Reus (2010) vor. Dabei wird der Deckungsbeitrag (= Umsatz minus variable Kosten) der untersuchten Varianten verglichen. Für Mais als Hauptfrucht zur energetischen Verwertung wurde ein Deckungsbeitrag von 448 € ermittelt. Der Anbau der Winterzwischenfrüchte verminderte durch einen negativen Deckungsbeitrag den Gesamtdeckungsbeitrag des Zweikultur-Nutzungssystems. So lag der Deckungsbeitrag von Roggen als Winterzwischenfrucht plus nachgebauten Mais im Zweikulturnutzungssystem bei lediglich 240 €. Die Kombination Winterrüben vor Mais erzielte einen insgesamt negativen Deckungsbeitrag. Diese ökonomische Bewertung anhand der Deckungsbeiträge berücksichtigt allerdings nicht den ökologischen Nutzen des Anbaus von Winterzwischenfrüchten. Dieser Nutzen ist schwer zu quantifizieren, er sollte jedoch bei der abschließenden Beurteilung von Winterzwischenfrüchten berücksichtigt werden.

Anhand der Methan-Flächenerträge wird deutlich, dass die Erträge der Winterzwischenfrüchte nicht das Niveau des Mais erreichen. So lagen die höchsten Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte bei etwa  $3300 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Winterroggen, Sorte „Vitallo“) die höchsten Methan-Flächenerträge des Mais lagen hingegen bei  $5300 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

Das Niveau der Methan-Flächenerträge von Winterzwischenfrüchten des vorgestellten Versuchs wird von Amon (2006) bestätigt, der für Triticale Methan-Flächenerträge von  $3600$  bis  $3700 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  angibt, allerdings bei einer Beerntung erst im Juni. Schindler (1997) kalkuliert die Wirtschaftlichkeit von Substraten für Biogasanlagen und geht von etwa  $3400 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  bei der Ganzpflanzensilage von Raps und etwa  $4500$  bis  $4800 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  für Getreide aus. Jedoch nennt er nur einen geringeren Methan-Flächenertrag von etwa  $4100 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (Triticale) wenn im Zweikulturnutzungssystem die Wachstumsdauer im Frühjahr verkürzt wird. Hahn (2007) nennt mittlere Methan-Flächenerträge von  $4330 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  von 25 verschiedenen Roggen-Varianten bei einer Ernte zum Ende Juni. Einen Methan-Flächenertrag von etwa  $2400 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  für Raps bei der Ernte Anfang Juni nennen Schumacher et al. (2007). Gröblichhoff et al. (2005) berichten über Methan-Flächenerträge von Grünroggen und Welschem Weidelgras die bei  $1600$  bis  $1920 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  lagen.

Weiterhin nennen Gröblichhoff et al. (2005) Methan-Flächenerträge von Silomais der nach Grünroggen oder Welschem Weidelgras kultiviert wurde, von  $4500$  bis  $5100 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ , während Silomais ohne Vorkultur einen Methan-Flächenertrag von  $5400$  bis  $6000 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  erbringen konnte. Weitere Methan-Flächenerträge von Mais nennen Amon et al. (2003). Die Werte liegen bei  $3000$  bis  $8500 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  und hängen laut Amon et al. (2003) u. a. von der Sorte und dem Standort ab. Des Weiteren erwähnen sie, dass der optimale Erntetermin sortenspezifisch unterschiedlich sein kann. Rund  $6000$

---

$\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  nennen Schumacher et al. (2007) als mittleren Methan-Flächenertrag von Mais. Oechsner et al. (2003) nennen TM-Erträge und spezifische Methanerträge für Mais. Aus diesen Daten können Methan-Flächenerträge von 4600 bis 9900  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  abgeleitet werden. Schumacher (2008) nennt für Silomais Methan-Flächenerträge von etwa 5700 bis 8000  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  und bestätigt ebenfalls das Niveau der Methan-Flächenerträge wie sie auch im vorgestellten Versuch ermittelt wurden.

Es ist anzumerken, dass der Anbau im Zweikulturnutzungssystem (Scheffer & Stülpnagel 1993) zwar etwa gleiche Ertragslieferungen von Winterzwischenfrucht und Zweitkultur vorsieht, diese Gleichstellung in der Praxis aber nicht leicht umzusetzen ist. Die Entscheidung zur Ernte der Winterzwischenfrucht bedeutet die Beendigung des Pflanzenwachstums in einer hochproduktiven Phase. Der Verzicht auf Biomassebildung der Winterzwischenfrüchte soll von den Erträgen der Zweitkultur nach Möglichkeit zumindest kompensiert werden. Die Bestimmung des optimalen Zeitpunktes zum „Kulturwechsel“ bedarf sicherlich noch weiterer Untersuchungen. Die Wahl der Winterzwischenfrucht (Pflanzenart und Sorte), aber auch die Auswahl der nachfolgenden Zweitkultur wird neben der Witterung für den optimalen Termin des Umbruchs der Winterzwischenfrucht bestimmend sein um insgesamt den maximalen Methan-Flächenertrag zu erzielen.

Zur Gestaltung der Abfolge von Kulturen im Energiepflanzenanbau gibt Karpenstein-Machan (1997) die Anbauempfehlung, für Standorte in klimatischen Gunstlagen das hohe Leistungsvermögen der häufig als Sommerung angebauten  $\text{C}_4$ -Pflanzen zu forcieren, in klimatischen Ungunstlagen jedoch der Winterung eine stärkere Gewichtung zu geben.

## 4.7 Korrelationen zwischen den erfassten Merkmalen

Mit den Korrelationen sollen Zusammenhänge der erfassten Parameter aufgezeigt werden. Hierbei fällt auf, dass die errechneten Korrelationen zu den Dezember-Terminen noch vergleichsweise stark, zum Ende des Winterzwischenfruchtanbaus jedoch sehr viel schwächer waren. Insbesondere die Beziehung zwischen der Spross-TM und den Nmin-Werten war im Dezember mit -0,726 (erstes Versuchsjahr) und -0,542 (zweites Versuchsjahr) deutlich stärker als im Mai der beiden Versuchsjahre (-0,228 im ersten Versuchsjahr bzw. -0,095 im zweiten Versuchsjahr). Auch die Korrelationen zwischen der Wurzel-TM und den Nmin-Werten folgten diesem Trend.

Dies bedeutet, dass bis zur Beprobung im Dezember die Varianten mit hohen Trockenmasse-Erträgen die größte Absenkung der Stickstoffmengen im Boden erreichten und diesen Stickstoff in der Biomasse konservieren konnten. Allerdings konnte anhand der Stickstoffmengen im Spross (Tabelle 18 und Tabelle 19) gezeigt werden, dass z.B. die Getreide-Varianten bei geringeren TM-Erträgen aufgrund ihrer relativ hohen Stickstoffgehalte im Spross in der Lage sind proportional mehr Stickstoff zu binden als andere Varian-

ten mit etwa gleicher TM-Bildung z. B. Rotklee und Wintererbsen. Hier liegen demzufolge pflanzenspezifische Eigenarten vor, die erklären, warum die Korrelationen zwischen der Trockenmasse des Sprosses und den Nmin-Werten im Dezember nicht enger waren als die tatsächlich errechneten Werte.

Die recht weite Korrelation zwischen der Spross-TM und den Nmin-Werten bei den Beprobungen im Mai ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei fast allen Varianten zum Zeitpunkt der höchsten Wachstumsraten (April/Mai) ein Großteil der mineralisierten Stickstoffmenge direkt von den Pflanzen aufgenommen wurde und folglich unter allen Varianten etwa gleich hohe Nmin-Werte gefunden wurden, die Erträge jedoch in einem größeren Bereich variierten. Dies könnte darin begründet sein, dass die geprüften Pflanzenarten unterschiedlich hohe Mengen an Stickstoff zum Aufbau ihrer Pflanzenmasse benötigen. Insbesondere dürfte hier der unterschiedliche Eiweißgehalt in der Biomasse von Bedeutung sein. Des Weiteren waren die am Versuch beteiligten Leguminosen-Varianten aufgrund ihrer Fähigkeit Luftstickstoff symbiotisch zu binden nach dem Winter nicht auf die Aufnahme von mineralisiertem Stickstoff aus der Bodenlösung angewiesen. Diese Varianten zeigten zum Mai leicht höhere Nmin-Werte im Boden als die Nicht-Leguminosen, bei gleichzeitig relativ hohen TM-Erträgen insbesondere im ersten Versuchsjahr. Somit folgen die Leguminosen nicht dem Grundsatz, dass sie hohe Stickstoffmengen aus der Bodenlösung aufnehmen müssen, um hohe TM-Erträge produzieren zu können.

Des Weiteren bestätigen die Korrelationen zwischen der sprossgebundenen Stickstoffmenge und den Nmin-Werten, die bei der Aufteilung der Varianten in Leguminosen und Nicht-Leguminosen gefunden wurden (Tabelle 28 und Tabelle 29), die Überlegung, dass auch die Leguminosen vor dem Winter Bodenstickstoff aufnahmen und dadurch den Nmin-Wert absenken konnten. Dies berichtet auch Haas (2004), der Leguminosen als Winterzwischenfrüchte vor Mais oder Weißkohl untersuchte und eine Aufnahme von etwa  $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  aus der Bodenlösung durch die Leguminosen nachweisen konnte.

Es zeigte sich, dass nur wenige signifikante Korrelationen zum Mai nachgewiesen werden konnten und dies vermutlich auf pflanzenphysiologische Unterschiede zwischen den geprüften Varianten zurückzuführen ist. Deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern können an zahlreichen Merkmalen aufgezeigt werden. So waren, wie bereits erwähnt, Leguminosen und Nicht-Leguminosen an den Untersuchungen beteiligt, die aufgrund der unterschiedlichen Stickstoffversorgung unterschiedliche Ansprüche an die Bodenlösung stellen (Geisler 1980). Ebenso können die Versuchsglieder in Dikotyle und Monokotyle unterschieden werden. Dikotyle Arten (z.B. Raps, Rotklee, Wegwarte) zeigen häufig ein allorrhizes Wurzelsystem mit einer insgesamt geringeren Durchwurzelung des Bodens als monokotyle Arten (z.B. Deutsches Weidelgras), die meist ein homorrhizes Wurzelsystem aufweisen und den Boden sehr stark durchdringen (Kutschera 1960, Strasburger 2008). Ferner gab es Pflanzenarten mit hohen Ansprüchen an die Wasserversorgung, z.B. Welsches Weidelgras (Dollinger & Hartmann 2010) aber auch Pflanzen-

arten, die auf trockeneren Standorten gedeihen können, z.B. Spitzwegerich (Kutschera 1960) und Knaulgras (Klapp 1974).

Somit kann davon ausgegangen werden, dass erhebliche morphologische und öko-physiologische Unterschiede zwischen den geprüften Pflanzenarten vorlagen. Unter anderem mögen diese Unterschiede und die Mineralisierungsvorgänge im Boden bei den ansteigenden Temperaturen im Frühjahr dazu beigetragen haben, dass in den beiden Versuchsjahren zum Mai hin die Korrelationen zwischen den Pflanzen- und Bodenmerkmalen weniger eng geworden sind als sie es früher im Jahr waren.

## 4.8 Indexberechnungen

### 4.8.1 Bewertung der Winterzwischenfrüchte anhand ihres $I_{RA}$ -Wertes

Als besonders erfolgreiche Winterzwischenfrüchte erwiesen sich zwei Gemengevarianten, das Landsberger Gemenge sowie das Gemenge aus Wicken und Roggen (Abbildung 34). Beide Varianten sind Kombinationen aus Leguminosen und Nicht-Leguminosen. In beiden Versuchsjahren zeigte dieser Mischanbau hohe  $Index_{Nmin}$ -Werte sowie hohe  $Index_{WZfr}$ -Werte. Landsberger Gemenge offenbarte lediglich beim  $Index_{Mais}$  negative Index-Werte, diese konnten jedoch durch die hohen  $Index_{Nmin}$ - und  $Index_{WZfr}$ -Werte kompensiert werden, sodass insgesamt ein hoher  $I_{RA}$ -Wert erreicht wurde. Die in beiden Gemengen vorkommenden Zottelwicken konnte in Reinsaat nur einen mittleren Platz in der Rangfolge einnehmen, zeigten aber aufgrund des  $Index_{Mais}$  noch einen positiven  $I_{RA}$ -Wert. Wenn Zottelwicken im Gemengeanbau etwa das gleiche C/N-Verhältnis aufweisen wie in Reinsaat, so ist zu vermuten, dass auch in den beiden Gemengen die Wirkung der Zottelwicken überwiegend darin bestand, die Umsetzung der Wurzelrückstände zu fördern.

Inkarnatklee konnte in Reinsaat und als Gemengepartner im Landsberger Gemenge einen hohen  $I_{RA}$ -Wert erzielen. Aufgrund der durchweg positiven Einzel-Indizes könnte versucht werden, verschiedene weitere Gemenge mit Inkarnatklee zu testen, interessant wäre z.B. ein Gemengeanbau von Welschem Weidelgras mit Inkarnatklee. Hier würden zwei Partner mit jeweils positiven  $Index_{Nmin}$  und positiven  $Index_{WZfr}$  gepaart. Des Weiteren könnte der negative  $Index_{Mais}$ , den das Welsche Weidelgras in Reinsaat zeigte, durch den positiven  $Index_{Mais}$  des Inkarnatklees im Gemengeanbau kompensiert werden. Allerdings muss einschränkend erwähnt werden, dass der  $I_{RA}$ -Wert des Inkarnatklees zum Großteil auf den hohen  $Index_{WZfr}$  zurückzuführen ist. Inwieweit sich dieser auch in Jahren mit weniger milden Wintern realisieren lässt, bedarf noch weiterer Überprüfungen.

Auffällig ist das schlechte Ergebnis der Getreide-Varianten, insbesondere des Roggens. Gerade diese Pflanzenart gilt als besonders geeignete Winterzwischenfrucht im Biogas-anbau (Sticksel et al. 2009). Jedoch konnten die Getreide-Varianten wegen der geringen Leistung bei der Stickstoffkonservierung sowie des ungünstigen Vorfruchteffektes und den unzureichenden Ertragsleistungen im zweiten Versuchsjahr keinen positiven  $I_{RA}$ -Wert erreichen. Ähnlich gestaltete sich der Aufbau des  $I_{RA}$ -Wertes bei den übrigen Getreide-Varianten; Wintertriticale und Wintergerste (Sorte „Dorothea“) konnten in keinem der drei Teil-Indizes einen positiven Wert erzielen und rangierten demzufolge an drittletzter bzw. letzter Position. Aufgrund der relativ großen Einflussnahme durch den  $Index_{Nmin}$  könnte der  $I_{RA}$ -Wert der Getreide-Varianten möglicherweise höhere Werte einnehmen, wenn das Getreide nicht erst im September, sondern schon im August ausgesät würde, weil dadurch vermutlich eine stärkere  $Nmin$ -Absenkung realisiert werden könnte (Vos & van der Putten 1997). In den beiden Versuchsjahren, die durch milde Winter zu charakterisieren sind, wären wahrscheinlich keine Auswinterungsverluste aufgetreten und die TM-Erträge im Frühjahr wären gleich hoch oder höher als im dargestellten Versuch gewesen. Auch wäre es möglich, dass bei früherer Aussaat die Trockenmassegehalte im Mai höher gewesen wären. Hiermit wäre eine verbesserte Silierfähigkeit eingetreten. Des Weiteren erfuhren die Getreide-Varianten einen Nachteil, da sie im zweiten Versuchsjahr aufgrund der Witterung nochmals später als im ersten Versuchsjahr gesät werden konnten. Dieser Nachteil hat sicherlich den  $I_{RA}$ -Wert der Getreide-Varianten negativ beeinflusst. Zugute kommen den Getreide-Varianten ihre Frostsicherheit (Geisler 1980), die zügige Entwicklung im Frühjahr sowie der hohe spezifische Methanertrag, der auch im vorgestellten Versuch festgestellt werden konnte.

Die Schwankungen des  $I_{RA}$ -Wertes, insbesondere der Getreide-Varianten zwischen den beiden Versuchsjahren machen deutlich, wie stark diese Varianten auf Umwelteinflüsse und Aussaattermin reagieren. Daher sollte  $I_{RA}$ , der hier über zwei Versuchsjahre dargestellt wurde, nicht überbewertet werden; weitere Untersuchungen insbesondere in Versuchsjahren mit kühleren Wintermonaten könnten die Aussagekraft von  $I_{RA}$  weiter verbessern.

#### 4.8.2 Charakterisierung von $I_{RA}$

Aufgrund der ungleichen Beschaffenheiten der am  $I_{RA}$ -Wert beteiligten Größen, basieren die drei Teil-Indizes auf unterschiedlichen mathematischen Berechnungen. Der  $Index_{Nmin}$  wurde so konstruiert, dass geringere  $Nmin$ -Werte als der Mittelwert aller Varianten zu positiven Index-Werten führen. Dagegen ist die Zielsetzung der beiden auf Ertrag ausgerichteten Teil-Indizes ( $Index_{WZfr}$  und  $Index_{Mais}$ ) derart, dass höhere Ertrags-Werte im Vergleich zum Mittelwert aller Varianten zu höheren positiven Index-Werten führen.

Durch die mathematische Gestaltung des  $\text{Index}_{N_{\min}}$  kann der errechnete  $\text{Index}_{N_{\min}}$ -Wert niemals größer werden als 1. Jedoch kann der  $\text{Index}_{N_{\min}}$  bei sehr hohen  $N_{\min}$ -Werten kleiner werden als -1. Folglich kann der Gesamtindex  $I_{RA}$  einer Variante durch sehr hohe  $N_{\min}$ -Werte stärker im negativen Werte-Bereich beeinflusst werden als er durch sehr geringe  $N_{\min}$ -Werte im positiven Bereich beeinflusst werden kann.

Dagegen sind der  $\text{Index}_{WZfr}$  und der  $\text{Index}_{Mais}$  so konstruiert, dass der jeweilige Index-Wert nie kleiner als -1 werden kann, jedoch im positiven Bereich größer als 1 werden kann. Hier kann der Gesamtindex  $I_{RA}$  einer Variante durch sehr hohe Erträge stärker im positiven Werte-Bereich beeinflusst werden als eine Beeinflussung durch sehr geringe Erträge im negativen Bereich möglich wäre.

Daher lässt sich sagen, dass sehr hohe  $N_{\min}$ -Werte sowie sehr hohe Erträge von Winterzwischenfrüchten oder Mais (Methan-Flächenerträge bzw. Spross-TM des Mais) gut abgebildet werden. Bei extrem geringen  $N_{\min}$ -Werten und extrem geringen Erträgen erreichen die Beträge für die entsprechenden Teil-Indizes jedoch maximal 1 (-1 bzw. +1). Diese Grenzwert-Situationen kamen allerdings im vorgestellten Versuch nicht vor. Die Überlegungen sollten jedoch dahin gehen, die drei Teil-Indizes so zu konstruieren, dass sie im negativen und im positiven Bereich die gleichen Randbedingungen aufweisen.

Einen ähnlich wie  $I_{RA}$  aufgebauten Index stellten Fuchs & Stockfisch (2008) vor. Sie errechneten die Effizienz des Zuckerrübenanbaus einzelner Schläge unter Berücksichtigung sehr verschiedener Faktoren wie z.B. Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz. Um eine Kenngröße zu erhalten, welche die Effizienz (= Verhältnis zwischen Ertrag und Aufwand) ausdrückt, wurde z.B. für den Faktor Bodenbearbeitung der Energieverbrauch ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) jeden Schlages ins Verhältnis zum Bereinigten Zuckerertrag ( $\text{t ha}^{-1}$ ) gesetzt. Diese Kenngröße wurde ähnlich wie bei den  $I_{RA}$ -Teil-Indizes durch das Mittel aller Kenngrößen der berücksichtigten Schläge dividiert, um den gewünschten Teil-Index für jeden Schlag zu erhalten. Auf diese Weise wurden für jeden der Faktoren Teil-Indizes errechnet, die zu einem Gesamt-Index („Effizienz-Indexzahl“) addiert wurden. Obwohl bei Fuchs & Stockfisch (2008) mit einer abgeleiteten Kenngröße gearbeitet wird, die die Effizienz beschreibt, in der eigenen Arbeit jedoch nur direkte Messwerte verwendet werden, sind die Index-Berechnungen im Prinzip gleichartig.

Die im vorgestellten Versuch ermittelten  $\text{Index}_{N_{\min}}$ -Werte lagen von ihrer Größenordnung leicht über den Werten des  $\text{Index}_{WZfr}$  und des  $\text{Index}_{Mais}$ . So war der Betrag der Werte des  $\text{Index}_{N_{\min}}$  vielfach in einem Bereich von 0,5 bis 0,7, während die Beträge des  $\text{Index}_{WZfr}$  und des  $\text{Index}_{Mais}$  selten größer als 0,5 waren (Abbildung 34). Diese leichte Überlegenheit des  $\text{Index}_{N_{\min}}$  könnte dazu geführt haben, dass die Varianten mit einem eher günstigen Verhalten bei der Stickstoffkonservierung einen Vorteil bei der Errechnung des Gesamt-Indexes  $I_{RA}$  erfahren haben. Dieses scheint aufgrund der bedeutenden ökologischen Zielsetzung, die mit dem Anbau der Winterzwischenfrüchte bezüglich des Gewässerschutzes verfolgt werden soll, durchaus erwünscht. Die leichte Begünstigung des  $\text{Index}_{N_{\min}}$  führte

bei der Addition der Einzel-Indizes im vorgestellten Versuch jedoch zu keiner allein bestimmenden Größe. Zwar war bei zahlreichen Varianten mit positivem  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  auch der  $I_{\text{RA}}$ -Wert positiv, doch führte ein positiver  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  nicht in jedem Fall zu positiven  $I_{\text{RA}}$ -Werten. Dieses wurde besonders beim  $I_{\text{RA}}$ -Wert des Spitzwegerichs und des Deutschen Weidelgrases deutlich, die trotz sehr guter  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$ -Werte in beiden Jahren insgesamt nur einen geringen, zum Teil sogar negativen,  $I_{\text{RA}}$ -Wert erzielen konnten.

Prinzipiell könnte für jeden Teil-Index des  $I_{\text{RA}}$ -Wertes durch die Multiplikation mit einem festgelegten Faktor eine gezielte Gewichtung vorgenommen werden. Des Weiteren ist es möglich in die Berechnung von  $I_{\text{RA}}$  weitere Teil-Indizes einfließen zu lassen. Hier könnte zum Beispiel ein Index für die Silierfähigkeit einbezogen werden. Grundlage hierfür könnte der Vergärbarkeitskoeffizient (Schmidt et al. 1971) sein. Außerdem ist es denkbar, den Wasserbedarf der Winterzwischenfrüchte oder die Wurzelmasse zur Humusreproduktion zu berücksichtigen. Ferner könnten auch für die Schwarzbrache Teil-Indizes berechnet und der  $I_{\text{RA}}$ -Wert der Schwarzbrache mit den  $I_{\text{RA}}$ -Werten der Winterzwischenfrüchte verglichen werden. Eine derartige Berechnung des  $I_{\text{RA}}$ -Wertes aus den Daten des vorgestellten Versuches ergab im Mittel über beide Versuchsjahre einen  $I_{\text{RA}}$ -Wert von -1,6 für die Schwarzbrache. Folglich konnten bei der Schwarzbrache die sehr geringen Werte des  $\text{Index}_{\text{Nmin}}$  (-0,96) und des  $\text{Index}_{\text{WZfr}}$  (-1) nicht durch den  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  (+0,39) kompensiert werden.

Im vorgestellten Versuch wurden beim Mais Ertragsminderungen nach verschiedenen Winterzwischenfrüchten festgestellt, die wahrscheinlich auf Stickstoff-Immobilisationsvorgänge zurückgeführt werden können. Durch eine Stickstoffdüngung mit mineralischen oder organischen Düngemitteln, auch mit Gärresten aus der Biogasanlage, könnten die Ertragsminderungen abgemildert werden (Kuo & Jellum 2000, Askegaard 2006). Durch eine Düngung würden die Amplitude des  $\text{Index}_{\text{Mais}}$  und dadurch die Auswirkung auf den Gesamt-Index  $I_{\text{RA}}$  vermutlich reduziert. Die Vorfruchtwirkung der Winterzwischenfrüchte auf den Mais wäre demzufolge durch eine Düngung weniger gut sichtbar. Um Kenntnisse über die Vorfruchtwirkung zu erhalten sollte eine Düngung daher unterbleiben.

Da alle Index-Berechnungen zum  $I_{\text{RA}}$ -Wert auf Mittelwerten aus den vorgestellten Ergebnissen aufbauen, lassen sich aus den genannten Index-Werten nur Aussagen über die relative Leistung innerhalb der vorgestellten Versuchs-Varianten treffen. Ein Vergleich von Varianten, die nicht unmittelbar am Versuch beteiligt waren, kann dementsprechend nicht erfolgen. Dieser Vergleich wäre unter Umständen möglich, wenn anstelle der Mittelwerte aus den Versuchsdaten in einem erweiterten Ansatz feste „Zielwerte“ für die einzelnen Teil-Indizes eingesetzt würden. So ist es denkbar, anstelle des Mittelwertes aller  $\text{Nmin}$ -Werte im Dezember einen Zielwert von  $40 \text{ kg Nmin ha}^{-1}$  anzunehmen und die Leistung aller Varianten auf diesen Wert zu beziehen. Da es aber zunächst bedeutsam war, einen Überblick über die am Versuch beteiligten Varianten zu erhalten, wurde auf eine derartige Standardisierung verzichtet. Trotz fehlender Standardisierung erscheint der Index der

relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  geeignet, die untersuchten 33 Varianten miteinander zu vergleichen und ihre Leistungsstärken abzubilden.

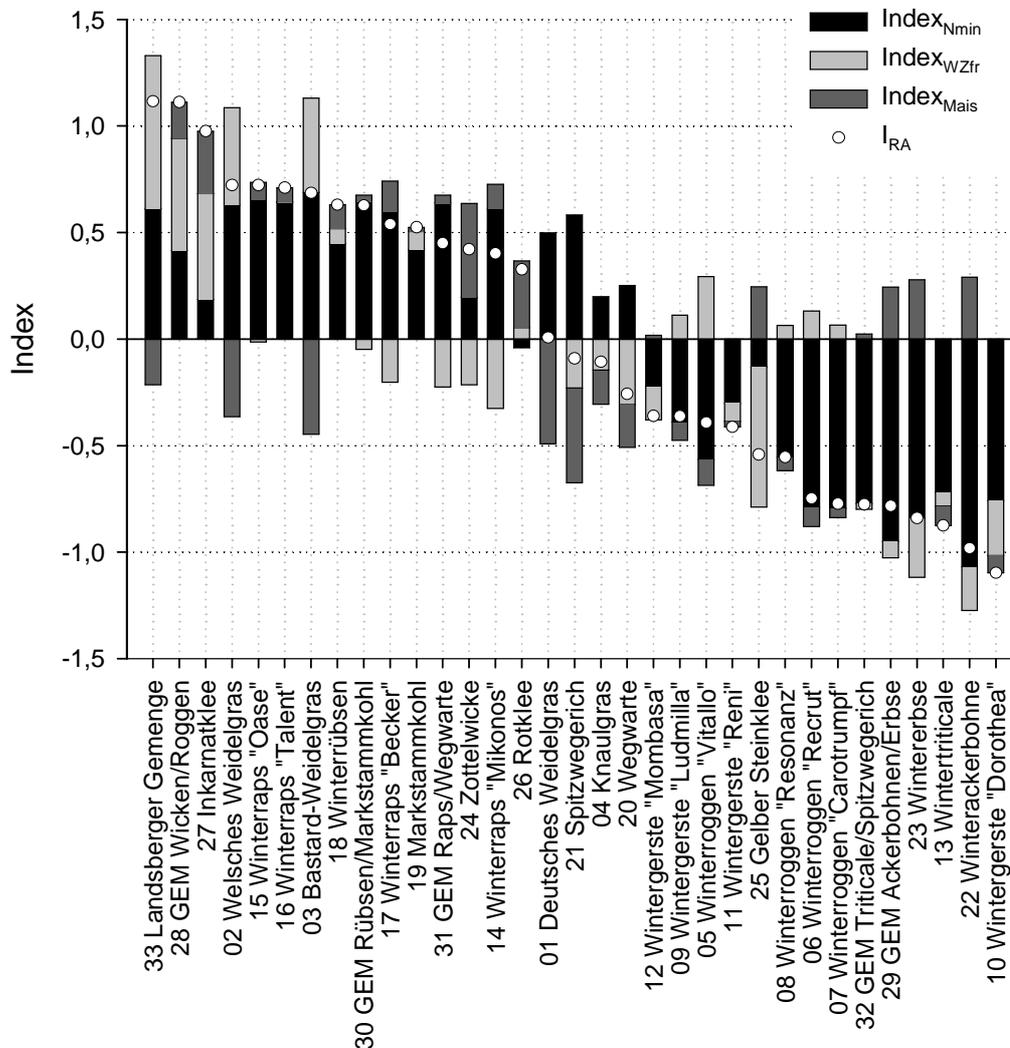


Abbildung 34: Mittlere Teil-Indizes und mittlerer Gesamtindex der relativen Anbauwürdigkeit  $I_{RA}$  von Winterzwischenfrüchten. Mittelwerte aus den zwei Versuchsjahren 2006/2007 und 2007/2008.

In Abbildung 34 sind abschließend die Teil-Indizes und die jeweiligen  $I_{RA}$ -Werte als Mittel aus den beiden Versuchsjahren aggregiert dargestellt. Die Rangfolge für die Winterzwischenfrüchte ergibt sich aus ihren  $I_{RA}$ -Werten. Alle in der Einleitung der Arbeit (Seite 3) formulierten Ziele sind in Abbildung 34 angesprochen.

## 5 Schlussfolgerungen

Aus den vorgestellten Ergebnissen wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

Die Futtergrasarten und Kreuzblütler, aber auch die kleinkörnigen Leguminosen Inkarnatklée und Zottelwicken, waren in der Lage den  $N_{min}$ -Wert im Winter deutlich abzusenken.

Die Wintergetreide-Varianten sowie die großkörnigen Leguminosen Winter-ackerbohnen und Wintererbsen sind zur Absenkung der  $N_{min}$ -Werte im Winter nicht geeignet.

Durch die Unterschiede im Wurzelwachstum der Winterzwischenfrüchte ließ sich nur ein kleiner Teil der Variabilität der  $N_{min}$ -Werte im Winter erklären.

Die Wintergetreide-Varianten, Landsberger Gemenge und das Gemenge aus Wicken und Roggen waren in der Lage hohe Trockenmasse- und Methan-Flächenerträge hervorzu- bringen.

Wintererbsen und Winterackerbohnen sowie die meisten der Getreidearten und -sorten einschließlich Triticale erwiesen sich als wenig anbauwürdig.

Die Getreide-Varianten zeigten die höchsten, die Leguminosen die geringsten spezifischen Methanerträge.

Geringe Trockenmassegehalte der Winterzwischenfrüchte führten zu unzureichender Silierfähigkeit, eine Anwelkphase wäre unverzichtbar.

Nach Schwarzbrache oder dem Anbau von Leguminosen sowie nach Kreuzblütlern konnten höchste Erträge der Zweitkultur Mais erzielt werden. Geringe Maiserträge wurden erreicht wenn Mais den Kräutern oder den Weidelgras-Varianten folgte.

Das Landsberger Gemenge und das Gemenge aus Wicken und Roggen sind die Winterzwischenfrüchte, die insgesamt am anbauwürdigsten erscheinen.

Im April/Mai sind sehr hohe Wachstumsraten möglich, durch frühzeitige Ernte der Winterzwischenfrucht wird unter Umständen auf Ertrag verzichtet, den die Folgekultur nicht auszugleichen vermag.

Die Wachstumsraten der Kreuzblütler sind etwa ab Mitte April gering, eine frühzeitige Ernte scheint hier geboten.

Durch Bildung von Teil-Indizes wird eine vergleichende Bewertung der Winterzwischenfrüchte ermöglicht.

Es ist gelungen die drei Teil-Indizes  $Index_{N_{min}}$ ,  $Index_{WZfr}$  und  $Index_{Mais}$  im  $I_{RA}$ -Wert zu aggregieren. Durch Weiterentwicklung von  $I_{RA}$  könnte mit diesem Index auch eine noch umfassendere Bewertung von Winterzwischenfrüchten erfolgen.

## 6 Zusammenfassung

Eine wichtige Pflanzenart für die Biogaserzeugung ist der Mais. Wird dieser nach einer Körnerfrucht angebaut, bleibt der Boden vor dem Mais lange ohne Bewuchs mit der Gefahr von Stickstoffverlagerungen in den Unterboden und ins Grundwasser. Aus dem Anbau von Winterzwischenfrüchten vor der Zweitkultur Mais soll sowohl ein Schutz vor negativen Umweltwirkungen durch Nitratverlagerungen im Herbst und Winter sowie die Erzeugung weiterer Biomasse für die energetische Nutzung in Biogasanlagen resultieren.

Ein Feldversuch wurde in den Jahren 2006 und 2007 auf dem Versuchsgut Reinshof der Universität Göttingen auf tiefgründigem Lössboden angelegt. Die Vorfrucht war in beiden Jahren Winterweizen, das Stroh blieb gehäckselt auf dem Feld zurück. Die Aussaat der Winterzwischenfrüchte erfolgte im August/September. Ein Stickstoffausgleich von 30 kg N ha<sup>-1</sup> wurde gegeben, es erfolgte keine weitere Düngung zu den Zwischenfrüchten. Nach dem Umbruch der Winterzwischenfrüchte im Mai 2007 bzw. 2008 wurde als Zweitkultur Energiemais (Sorte „Atletico“, S 280, KWS) gesät. Der Mais blieb ungedüngt. Die Maisernte war jeweils Anfang November. Die Witterung der Wintermonate beider Versuchsjahre war als überdurchschnittlich warm mit leicht überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen zu charakterisieren.

Im Versuch wurden Futtergrasarten, Wintergetreide, Kreuzblütler, Leguminosen, die Kräuter Wegwarte und Spitzwegerich sowie sechs Gemenge dieser Arten angebaut. Einige Pflanzenarten wurden mit jeweils vier Sorten geprüft. Einschließlich einer als Kontrolle angelegten Schwarzbrache-Variante umfasste der Versuch 34 Prüfglieder. Während des Versuchszeitraumes wurden die N<sub>min</sub>-Werte im Boden (NO<sub>3</sub>-N + NH<sub>4</sub>-N) in einer Tiefe bis 90 cm in drei Schichten gemessen. Diese Messungen erfolgten zur Aussaat der Zwischenfrüchte, ferner im Dezember, März, April sowie im Mai. Zeitgleich wurde an den genannten Terminen der Aufwuchs erfasst und dessen sprossgebundene Stickstoffmenge ermittelt. Darüber hinaus wurden im Dezember und Mai Wurzelproben entnommen. Die spezifischen Methanerträge der Winterzwischenfrüchte wurden im praktischen Gärversuch (Hohenheimer Biogasertragstest) gemessen. Der Methan-Flächenertrag des Maises wurde mit Hilfe eines Pauschalwertes von 0,321 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> berechnet.

Es wurde ein Index der relativen Anbauwürdigkeit ( $I_{RA}$ ) eingeführt. Dieser Index ermöglicht es, durch Zusammenfügung von drei Teil-Indizes die Leistungsfähigkeit der Winterzwischenfrüchte im Hinblick auf die N<sub>min</sub>-Absenkung im Frühwinter ( $Index_{N_{min}}$ ), die Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte ( $Index_{WZfr}$ ) sowie den Ertrag des nachfolgenden Energiemaises ( $Index_{Mais}$ ) in einem Gesamtindex abzubilden.

Die Reduzierung der N<sub>min</sub>-Werte bis zum Dezember gelang besonders wirkungsvoll mit dem Anbau von Futtergrasarten und Kreuzblütlern. Ebenfalls günstig verhielten sich die

beiden geprüften Kräuter-Varianten, die kleinkörnigen Leguminosen, z.B. Inkarnatklee und Zottelwicken, sowie einige Gemenge. Hingegen waren die großkörnigen Leguminosen und die Getreide-Varianten nicht in der Lage eine deutliche Absenkung der Nmin-Werte im Frühwinter herbeizuführen.

Die Nmin-Werte lagen zur Ernte und Umbruch der Winterzwischenfrüchte im Mai bei den Nicht-Leguminosen zwischen 13 und 23 kg N ha<sup>-1</sup>. Die Nmin-Werte der Leguminosen lagen leicht darüber (17 bis 38 kg N ha<sup>-1</sup>). Deutlich höhere Nmin-Werte als nach dem Anbau von Winterzwischenfrüchten wurden im Mai des ersten und zweiten Versuchsjahres bei Schwarzbrache (89 bzw. 46 kg N ha<sup>-1</sup>) gemessen.

Bei den Untersuchungen der Wurzelproben im Dezember wurden hohe Wurzellängendichten (WLD) bei den Weidelgras-Varianten, dem Spitzwegerich, dem Gemenge aus Wicken und Roggen sowie dem Landsberger Gemenge von 3 bis nahezu 10 cm cm<sup>-3</sup> gefunden. Die WLD der Kreuzblütler, Getreide-Varianten und Leguminosen waren deutlich geringer und erreichten teilweise nur Werte von unter 0,2 cm cm<sup>-3</sup>. Es konnte beobachtet werden, dass auch Winterzwischenfrüchte mit geringer Wurzellängendichte den Bodenstickstoff im Frühwinter effektiv zu binden vermochten. So offenbarten z.B. die Kreuzblütler erheblich geringere WLD als die Weidelgras-Varianten bei etwa gleicher Nmin-Absenkung. Die Korrelationskoeffizienten zwischen WLD und den Nmin-Werten im Dezember lagen bei  $r = -0,42$  (2006) bzw.  $r = -0,48$  (2007).

Zahlreiche Winterzwischenfrucht-Varianten konnten zur Ernte im Mai Biomasseerträge von über 90 dt TM ha<sup>-1</sup> erzielen, wobei im ersten Versuchsjahr aufgrund sehr günstiger, milder Witterung ein leicht höheres Ertragsniveau erreicht wurde als im zweiten Versuchsjahr. Als besonders ertragreich erwiesen sich die Roggen-Varianten, Inkarnatklee, das Gemenge aus Wicken und Roggen sowie das Landsberger Gemenge. Im zweiten Versuchsjahr konnten die Getreide-Varianten aufgrund witterungsbedingt verspäteter Aussaat nur geringe Erträge erbringen. Hohe Wachstumsraten von teilweise 18 g TM m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> im April/Mai führten dazu, dass ein Großteil (bis zu 63 dt TM ha<sup>-1</sup>) der geernteten Biomasse erst in den letzten fünf Wochen vor Ernte und Umbruch im Mai gebildet wurde.

Die Trockenmassegehalte der Winterzwischenfrüchte lagen im April beider Versuchsjahre im Bereich von 11 bis 26 %. Die zur unmittelbaren Silierung benötigten Trockenmassegehalte wurden somit nicht erreicht. Zur Ernte im Mai konnten lediglich im ersten Versuchsjahr einige Getreide-Varianten und das Gemenge aus Wicken und Roggen die gewünschten 30% Trockenmassegehalt erreichen, sodass auch zu diesem späteren Erntetermin bei vielen Varianten eine Anwelkphase notwendig gewesen wäre.

Mit der oberirdischen Biomasse wurden im Mai erhebliche Mengen Stickstoff abgeerntet. So zeigten die Nicht-Leguminosen sprossgebundene Stickstoffmengen von 56 bis 110 kg N ha<sup>-1</sup> im ersten Versuchsjahr und 27 bis 75 kg N ha<sup>-1</sup> im zweiten Versuchsjahr. Die Stickstoffmengen im Spross der Leguminosen waren deutlich größer als bei den Nicht-

Leguminosen. Die höchsten Mengen an sprossgebundenem Stickstoff fanden sich mit bis zu  $300 \text{ kg N ha}^{-1}$  bei den Winterackerbohnen.

In der überwiegenden Zahl der Fälle waren die Sortenunterschiede innerhalb der mehrfach geprüften Arten gering. Lediglich bei der als Winter-Braugerste zugelassenen Sorte „Dorothea“ gab es die auffällige Tendenz zu einer geringeren Stickstoffaufnahme aus dem Boden, verglichen mit den anderen geprüften Gerstensorten. Bei den Winterroggen-Varianten zeigte die Sorte „Vitallo“ höhere Erträge als die anderen Winterroggensorten.

Die Futtergrasarten und Getreide-Varianten zeigten höhere spezifische Methanerträge als die Kreuzblütler und deutlich höhere spezifische Methanerträge als die Leguminosen. Der höchste spezifische Methanertrag wurde von der Winterroggensorte „Carotrumpf“ ( $0,317 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$ ) erreicht, den geringsten spezifischen Methanertrag zeigte Rotklee ( $0,238 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg TM}^{-1}$ ). Die aus den spezifischen Methanerträgen und Sprosserträgen errechneten Methan-Flächenerträge lagen bei den Getreide-Varianten und beim Landsberger Gemenge teilweise über  $3000 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

Der TM-Ertrag des Mais lag in beiden Versuchsjahren im oberen Ertragsbereich ( $165$  bzw.  $136 \text{ dt TM ha}^{-1}$ ), wenn der Mais nach Schwarzbrache angebaut wurde. Auch nach dem Anbau von Leguminosen konnte ein hoher Maisertrag erreicht werden, während nach dem Anbau von Futtergrasarten und Getreide erheblich geringere Maiserträge erzielt wurden. Der Methan-Flächenertrag des Mais lag nach Leguminosen zwischen  $4000$  und  $5100 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  und nach den Futtergrasarten nur bei  $1300$  bis  $3400 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

Höchste kombinierte Methan-Flächenerträge von bis zu  $7400 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  aus Winterzwischenfrucht und Mais wurden erzielt, wenn Mais nach Leguminosen angebaut wurde. Geringe Methan-Flächenerträge, die z.T. deutlich unterhalb des Methan-Flächenertrages von Mais ohne vorheriger Winterzwischenfrucht (Schwarzbrache) lagen, wurden bei der Kombination von Weidelgrasarten oder Kräutern mit Mais ( $2500$  bis  $5100 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) erreicht.

Auf der Grundlage des Index der relativen Anbauwürdigkeit ( $I_{RA}$ ) wurde eine Rangliste erstellt, nach der ein Anbau des Landsberger Gemenges und des Gemenges aus Wicken und Roggen besonders zu empfehlen ist. Die Getreide-Varianten und die großkörnigen Leguminosen erscheinen aufgrund unzureichender Leistungen, insbesondere hinsichtlich der  $N_{min}$ -Absenkung im Frühwinter, insgesamt als wenig anbauwürdig.

Mit einer Standardisierung von  $I_{RA}$  könnte dieser Index auch zur Bewertung von Varianten externer Winterzwischenfruchtversuche verwendet werden. Durch Einbeziehung zusätzlicher Parameter, z.B. der Silierfähigkeit, des Wasserverbrauchs oder der Humusreproduktion würde die Aussagekraft von  $I_{RA}$  zur Einschätzung von Winterzwischenfrüchten weiter gesteigert.

---

## 7 Literaturverzeichnis

Abdoun, E. & P. Weiland, 2009: Optimierung der Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch Zugabe von Spurenelementen. Wieviel Biogas steckt in Pflanzen, Abschluss-Symposium der Biogas Crops Network (BCN), Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 68, 69-79.

Aigner, A. & E. Sticksel, 2010: Derzeitige Einschätzung von Zwischenfrüchten als Substrat zur Biogasgewinnung.

[http://www.lfl.bayern.de/ipz/pflanzenbau\\_biogas/30222/zwischenfrucht\\_biogas\\_09.pdf](http://www.lfl.bayern.de/ipz/pflanzenbau_biogas/30222/zwischenfrucht_biogas_09.pdf)

besucht am 14. Januar 2010.

Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, W. Zollitsch, K. Mayer, S. Buga & A. Amid, 2003: Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis späteifen Maissorten. Bericht über die 54. Tagung 2003 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, Tagungsband BAL Gumpenstein, 1-10.

Amon, T., V. Kryvoruchko, K. Hopfner-Sixt, B. Amon, V. Bodiroza, M. Ramusch, R. Hrbek, J. K. Friedel, W. Zollitsch & J. Boxberger 2006: Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.

[http://www.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogaserzeugung\\_aus\\_Energiepflanzen.pdf](http://www.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogaserzeugung_aus_Energiepflanzen.pdf)

besucht am 22. Februar 2010.

Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, S. Buga, A. Amid, W. Zollitsch, K. Mayer & E. Pötsch, 2010: Biogaserträge aus landwirtschaftlichen Gärgütern.

[http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogasertr\\_ge\\_aus\\_Idwl\\_\\_G\\_\\_rg\\_tern\\_BAL\\_\\_LKKStmk.pdf](http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H931/AmonPublikationen/Biogasertr_ge_aus_Idwl__G__rg_tern_BAL__LKKStmk.pdf)

besucht am 22. Februar 2010.

Anonymus 2009: Bakterien auf die Sprünge helfen. AGRAVIS aktuell Heft 2, 26-27.

[http://www.agravis.de/webs/webs\\_deployment/media/pdf/konzern\\_2/agravisaktuell\\_1/0209/Agravis0209.pdf](http://www.agravis.de/webs/webs_deployment/media/pdf/konzern_2/agravisaktuell_1/0209/Agravis0209.pdf)

besucht am 21. Oktober 2010.

---

Aschmann, V., M. Effenberger, A. Gronauer, F. Kaiser, R. Kissel, H. Mitterleitner, S. Nesser, M. Schlattmann, M. Speckmaier & G. Ziehfrend, 2007: Grundlagen und Technik. Biogashandbuch Bayern – Materialband – Kapitel 1.1 – 1.5, 4-90.

(<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/doc/kap1bis15.pdf?pid=1101010100205tp://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/doc/kap1bis15.pdf?pid=1101010100205>)

besucht am 08. Februar 2010.

Askegaard, M. 2006: Residual effect and leaching of N and K in cropping systems with legume and non-legume cover crops on a coarse sand.

<http://orgprints.org/7896/>

besucht am 13. August 2010.

Askegaard, M. & J. Eriksen, 2008: Residual effect and leaching of N and K in cropping systems with clover and ryegrass catch crops on a coarse sand. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123, 99-108.

Baeumer, K., 1978: Allgemeiner Pflanzenbau, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2. Auflage.

Berendonk, C. 2008: Zwischenfrüchte für Futternutzung und Biogaserzeugung 2008. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 1-9.

<http://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/zwischenfruchtanbau-zur-futternutzung-und-biogaserzeugung-2008.pdf>

besucht am 08. Februar 2010.

Berger, G., K. Richter & K. Schmalzer, 1993: Zur Wirkung des Zwischenfruchtanbaus auf die winterliche Nmin-Dynamik im Boden und die Stickstoff-Konservierungsleistung unter den spezifischen Bedingungen der sandigen Böden des norddeutschen Tieflandes. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 6, 21-24.

Bodner, G., P. Liebhard & R. Jud, 2001: Auswirkungen von Winterbegrünungen auf Nitratsdynamik und Bodenwasserhaushalt im Trockengebiet. *Arbeitsgemeinschaft landwirtschaftlicher Versuchsanstalten, Jahrestagung 2001 in Wolfpassing*, 95-97.

Böhm, W., 1979: *Methods of studying root systems*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Böhmel, C. & W. Claupein, 2006: Anbau von Energiepflanzen in standortangepassten Fruchtfolgen; mögliches Arten- und Sortenspektrum sowie Nutzungszeitpunkte im Hinblick auf Ertrag und Nachhaltigkeit. Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim, Aufsatz, 1-6.

[http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1195659\\_1/lap\\_Anbau%20von%20Energiepflanzen%20in%20Fruchtfolgen%20\(B%C3%B6hmel,%20Claupein\).pdf](http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1195659_1/lap_Anbau%20von%20Energiepflanzen%20in%20Fruchtfolgen%20(B%C3%B6hmel,%20Claupein).pdf)

besucht am 26. Januar 2010.

---

Brandi-Dohrn, F. M., M. Hess, J. S. Selker, R. P. Dick, S. M. Kauffman & D. D. Hemphill, Jr., 1997: Nitrate Leaching under a cereal rye cover crop. *Journal of Environmental Quality* 26, 181-188.

Bundesministerium der Justiz, 2001: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001).

Bundesministerium der Justiz, 2004: Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung) vom 4. November 2004

<http://bundesrecht.juris.de/direktzahlverpflv/BJNR277800004.html>

besucht am 14. September 2010.

Bundesministerium der Justiz, 2008: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG).

[http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/eeg\\_2009/gesamt.pdf](http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/eeg_2009/gesamt.pdf)

besucht am 1. September 2010.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010: Die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und ihre Umsetzung in Deutschland.

[http://www.bmu.de/gewaesserschutz/fb/gewaesserschutzpolitik\\_d\\_eu\\_int/doc/3063.php](http://www.bmu.de/gewaesserschutz/fb/gewaesserschutzpolitik_d_eu_int/doc/3063.php)

besucht am 1. September 2010.

Bundessortenamt, 2007 : Beschreibende Sortenliste, Futtergräser, Esparsette, Klee, Luzerne, Bundessortenamt, Hannover, 84.

[http://www.bundessortenamt.de/internet30/fileadmin/Files/PDF/bsl\\_futtergraeser\\_2007.pdf](http://www.bundessortenamt.de/internet30/fileadmin/Files/PDF/bsl_futtergraeser_2007.pdf)

besucht am 07. Februar 2010.

Clark, A. J., Decker, A. M. & J. J. Meisinger, 1994: Seeding rate and kill effects on hairy vetch-cereal rye cover crop mixtures for corn production. *Agronomy Journal* 86, 1065-1070.

Dean, J. R. & K. W. Clark, 1980: Effect of low level nitrogen fertilization on nodulation, acetylene reduction and dry matter in fababeans and three other legumes. *Canadian Journal of Plant Science* 60, 121-130.

Döhler, H., H. Ecke, N. Fröba, S. Grebe, S. Hartmann, U. Häußermann, S. Klages, N. Sauer, S. Nakazi, A. Niebaum, U. Roth, B. Wirth & S. Wulf, 1998: *Faustzahlen Biogas*. Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, 2. Auflage.

---

Dollinger, L. & S. Hartmann, 2010: Standort- und Klimaansprüche.

<http://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/38678/>

besucht am 22.November 2010.

Doran, J.W. & M.S. Scott, 1991: Role of cover crops in nitrogen cycling. In: Cover crops for clean water. (ed. H.L Hargrove). Soil and water conservation society, 85-90.

Dou, Z., R.H. Fox & J.D. Toth, 1994: Tillage effects on seasonal nitrogen availability in corn supplied with legume green manures. *Plant and Soil* 162, 203-210.

Eder, B., M. Mukengele, C. Papst, B. Darnhofer, H. Oechsner & J. Eder, 2008: Der ideale Typ. *Biogas Journal* Heft 1, 29-35.

Eichler, B., B. Zachow, S. Bartsch, D. Köppen & E. Schnug, 2004: Influence of catch cropping on nitrate contents in soil and soil solution. *Landbauforschung Völkenrode* Heft1, 7-12.

Elers, B. & H. D. Hartmann, 1987: Welche Zwischenfrüchte binden das meiste Nitrat? *DLG-Mitteilungen* Heft 10, 526-529.

Enzewor, W. O., 1976: The mineralization of nitrogen and phosphorus in organic materials of varying C:N and C:P ratios. *Plant and Soil* 44, 237-240.

Ericsson, T. 1995: Growth and shoot: root ratio of seedlings in relation to nutrient availability. *Plant and Soil* 168-169, 205-214.

Fischbeck, G., K. U. Heyland & N. Knauer, 1982: *Spezieller Pflanzenbau*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.

Fox, R. H., R. J. K. Myers & I. Vallis, 1990: The nitrogen mineralisation rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin and nitrogen contents. *Plant and Soil* 129, 251-259.

Fuchs, J. & N. Stockfisch, 2009: Effizienzentwicklung im Zuckerrübenanbau am Beispiel der N-Düngung. *Zuckerindustrie* 134, 33-41.

Francis, G. S., K.M.Bartley & F.J.Tabley, 1998: The effect of winter cover crop management on nitrate leaching losses and crop growth. *The Journal of Agricultural Science* 131, 299-308.

Frankenberger Jr., W. T. & H. M. Abdelmagid, 1985: Kinetic parameters of nitrogen mineralization rates of leguminous crops incorporated into soil. *Plant and Soil* 87, 257-271.

---

Gardner, F. P., R. B. Pearce & R. L. Mitchell, 1985: Physiology of crop plants. Iowa State University Press.

Geisler, G., 1980: Pflanzenbau. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.

Graß, R., 2003: Direkt- und Spätsaat von Silomais – Ein neues Anbausystem zur Reduzierung von Umweltgefährdungen und Anbauproblemen bei Optimierung der Erträge. Cuvillier Verlag, Göttingen.

Gröblichhoff, F.-F., N. Lütke Entrup & K. Block, 2005: Mais liefert viel Methan. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe 13, 34-36.

Gselman, A. & B. Kramberger, 2008: Benefits of winter legume cover crops require early sowing. Australian Journal of Agricultural Research 59, 1156-1163.

Gutser, R. & K. Vilsmeier, 1985: N-Umsatz von verschiedenem Pflanzenmaterial im Boden in Gefäß- und Feldversuchen. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 148,595-606.

Haas, G., 2004: Stickstoffversorgung von Weiskohl, Silo- und Körnermais durch Winterzwischenfrucht-Leguminosen. Schriftenreihe Institut für organischen Landbau. Verlag Dr. Hans-Joachim Köster, Berlin.

Hahn, V., 2007: Sonnenblumen und Roggenganzpflanzen als Biogassubstrat. Symposium Energiepflanzen. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 31,134-140.

Heiermann, M., B. Linke, M. Klocke, V. Scholz & P. Grundmann, 2009: Biogas – effizient erzeugen und nachhaltig nutzen. Forschungs Report 1/2009 des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 4-7.

Helffrich, D., & H. Oechsner, 2003: Hohenheimer Biogasertragstest. Agrartechnische Forschung 9 Heft 3, 27-30.

Herrmann, C., M. Heiermann, C. Idler & F. Hertwig, 2009: Einfluss von Trockenmassegehalt (Abreife), Häcksellänge und Silierung auf die Biogasausbeute von Mais. Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 331, 87-104.

Herrmann, C., M. Heiermann, C. Idler & V. Scholz, 2007: Parameters influencing substrate quality and biogas yield. From research to market development: 15th European Biomass Conference & Exhibition, 809-819.

Hötte, S., G. Stemann & N. Lütke Entrup, 2010: Die Asse für den Energiemix. top agrar Heft 3, 92-95.

---

Holderbaum, J. F., A. M. Decker, J. J. Meisinger, F. R. Mulford & L. R. Vough, 1990: Fall-seeded legume cover crops for no-tillage corn in the humid east. *Agronomy Journal* 82, 117-224.

Honeycutt, C. W. & L. J. Potaro, 1990: Field evaluation of heat units for predicting crop residue carbon and nitrogen mineralisation. *Plant and Soil* 125, 213-220.

Ilgen, B., 1990: Wachstumsverlauf und N-Aufnahme verschiedener Zwischenfruchtarten in Abhängigkeit vom NO<sub>3</sub>-Angebot im Boden. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Isse, A.A., A.F. MacKenzie, K. Steward, D.C. Cloutier & D.L. Smith, 1999: Cover crops and nutrient retention for subsequent sweet corn production. *Agronomy Journal* 91, 934-939.

Jäkel, K., 2007: Der Schwefel muss raus. DLZ – Agrarmagazin: die landwirtschaftliche Zeitschrift 58 Heft 2, 90-96.

Kaiser, E. & K. Weiß, 2003: Modell zur Einschätzung der Vergärbarkeit von Grünfütter. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau in der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.. 47. Jahrestagung vom 28. bis 30. August in Braunschweig. Wissenschaftlicher Fachverlag Giessen, 191-194.

Kaiser, F., M. Diepolder, J. Eder, S. Hartmann, H. Prestele, R. Gerlach, G. Ziehfrend & A. Gronauer, 2004: Ertragspotenziale verschiedener nachwachsender Rohstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. LfL in Zusammenarbeit mit dem Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Biogas in Bayern, Tagungsband zur Jahrestagung am 9. Dezember 2004 in Rosenheim, 43-53.

Karpenstein-Machan, M., 1997: Energiepflanzenbau für Biogasbetreiber, DLG Verlag, Frankfurt.

Karpenstein-Machan, M. & R. Stülpnagel, 2000: Biomass yield and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. *Plant and Soil* 218, 215-232.

Kessavalou, A. & D. T. Walters, 1997: Winter rye as a cover crop following soybean under conservation tillage. *Agronomy Journal* 89, 68-74.

Keymer, U. , 2004: Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.

[http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel\\_list=2%2Cb&strsearch=&pos=left](http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel_list=2%2Cb&strsearch=&pos=left)

---

besucht am 17. Februar 2010.

Klapp, E., 1974: Taschenbuch der Gräser. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 10. Auflage.

Klimanek, E.-M., 1987: Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Fruchtarten – wissenschaftliche Einzelveröffentlichung -. Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Müncheberg.

Köhnlein, J. & H. Vetter, 1953: Ernterückstände und Wurzelbild. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

Könekamp, A. & E. Zimmer, 1955: Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen Völkenrode 1949 – 1953. Zeitschrift für Pflanzenernährung Düngung Bodenkunde 68 (113), 158-169.

König, U.J., 1996: Zwischenfruchtanbau von Leguminosen. Abschlußbericht des Forschungsprojektes: Verfahren zur Minimierung der Nitratausträge und Optimierung des N-Transfers in die Folgefrüchte beim Zwischenfruchtanbau von Leguminosen. Schriftenreihe: Band 6. Institut für biologisch-dynamische Forschung, Darmstadt.

Kristensen, H. L. & K. Thorup-Kristensen, 2004: Root growth and nitrate uptake of three different catch crops in deep soil layers. Soil Science Society of America Journal 68, 529-537.

Kuo, S. & E. J. Jellum, 2000: Long-term winter cover cropping effects on corn (*Zea mays* L.) production and soil nitrogen availability. Biology and Fertility of Soils 31, 470-477.

Kuo, S. & E. J. Jellum, 2002: Influence of winter cover crop and residue management on soil nitrogen availability and corn. Agronomy Journal 54, 501-508.

Kuo, S., U. M. Sainju & E. J. Jellum, 1997a: Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. Soil Science Society of America Journal 61, 145-152.

Kuo, S., U. M. Sainju & E. J. Jellum, 1997b: Winter cover cropping influence on nitrogen in soil. Soil Science Society of America Journal 61, 1392-1399.

Lainé, P., A. Ourry, J. Macduff, J. Boucaud & J. Salette, 1993: Kinetic parameters of nitrate uptake by different catch crop species: effects of low temperatures or previous nitrate starvation. Physiologia Plantarum 88, 85-92.

Lewan, E., 1994: Effects of a catch crop on leaching of nitrogen from a sandy soil: Simulations and measurements. Plant and Soil 166, 137-152.

---

Lütke Entrup, N. 2001: Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau. AID Bonn, Heft 1060, Bonn.

Lütke Entrup, N., F.-F. Gröblichhoff, K. Block, C. Berendonk, J. Clemens, S. Wulf, K. Spoth & C. Rieker (2008): Entwicklung von Anbaufolgen zur Erzeugung von Biomasse für die Biogaserzeugung. Abschlussbericht an das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Lütke Entrup, N. & J. Oehmichen, 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 2: Kulturpflanzen. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen.

Meisinger, J. J., W. L. Hargrove, R. L. Mikkelsen, J. R. Williams & V. W. Benson, 1991: Effects of cover crops on groundwater quality. In W. L. Hargrove: Cover crops for clean water: The proceedings of an international conference, West Tennessee, 9. - 11. April 1991. Soil and Water Conservation Society, 57-68.

Moeller, L., C. Herbes, R.A. Müller & A. Zehnsdorf, 2010: Schaumbildung und -bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung. Landtechnik, 65, Heft 3, 204-207.

Mokry, M., 2008: Wert- und Schadstoffe von Gärresten aus Biogasanlagen – Folgerungen für die Verwendung. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Außenstelle Rheinstetten-Forchheim, Tagungsband 3. Workshop, Pflanzliche Rohstoffe zur Biogasgewinnung, IfPP Heft 1, 3-1-3-9.

Odhambo, J. J. O. & A. A. Bomke, 2001: Grass and legume cover crop effects on dry matter and nitrogen accumulation. Agronomy Journal 93, 299-307.

Oechsner, H., A. Lemmer & C. Neuberg, 2003: Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. Landtechnik Heft 3, 146-147.

Pahlow, G. & F. Weißbach, 1999: New aspects of evaluation and application of silage additives. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 206, 141-158.

Pedersen, A., K. Thorup-Kristensen & L.S. Jensen, 2009: Simulating nitrate retention in soils and the effect of catch crop use and rooting pattern under the climatic conditions of Northern Europe. Soil Use and Management 25, 243-254.

Poth, S., T. Sieker & R. Ulber, 2010: Gewinnung von Presssäften aus feuchter Biomasse. Chemie Ingenieur Technik, Sonderheft: ProcessNet-Jahrestagung 2010 und 28. Jahrestagung der Biotechnologen 82/9, 1592.

Power, J. F., J. W. Doran & P. T. Koerner, 1991: Hairy vetch as a winter cover crop for dryland corn production. Journal of Production Agriculture 4, 62-67.

---

Rannels, N. N. & M. G. Wagger, 1996: Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agronomy Journal* 88, 777-782.

Rannels, N. N. & M. G. Wagger, 1997: Winter annual grass-legume bicultures for efficient nitrogen management in no-till corn. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 65, 23-32.

Reents, H.J. & D. Möller, 2000: Effects of different green manure catch crops grown after peas on nitrate dynamics in soil and on yield and quality of subsequent potatoes and wheat. *Proceedings 13th international IFOAM Scientific Conference, Zürich*, 73-76.

Reineke, T., 2009: Anbau von Energiemais nach Winterzwischenfrüchten. Masterarbeit im wissenschaftlichen Studiengang Agrarwissenschaften an der Georg-August-Universität Göttingen.

Reulein, J., R. Stülpnagel, K. Scheffer & M. Wachendorf, 2007: Verbesserung der Brennstoffeigenschaften landwirtschaftlicher Biomasse durch eine mechanische Entwässerung von Silagen. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Band 8. Referate und Poster der 51. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 198-201.

Reus, D., 2010: Ökonomische Bewertung. In: *Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) Gülzow*, 99-108.

Rinnofner, T., R. Farthofer, J.K. Friedel, G. Pietsch, A. Strauss-Sieberth, W. Loiskandl & B. Freyer, 2006: Stickstoffaufnahme und Biomasseertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Folgekultur und Nitratgehalte in der Bodenlösung unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet. *Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*.

[http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H93/H933/Personen/Pietsch/Rinnofner-END.pdf](http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H933/Personen/Pietsch/Rinnofner-END.pdf)  
besucht am 28. August 2010.

Robinson, D., D. J. Linehan & S. Caul, 1991: What limits nitrate uptake from soil? *Plant, Cell and Environment* 14, 77-85.

Rodrigues, M.A., J. Coutinho & F. Martins, 2002: Efficacy and limitations of tritcale as a nitrogen catch crop in a mediterranean environment. *European Journal of Agronomy* 17, 155-160.

Roth, F., R. Rauber & W. Link, 2009: Optimierung von Aussaat- und Erntezeitpunkt bei Winterzwischenfrüchten vor Energiemais. Postervorstellung auf der 52. Jahrestagung

---

vom 1. bis 3. September 2009 in Halle (Saale) der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.

<http://www.uni-goettingen.de/de/128044.html>

besucht am 3. September 2010.

Sauerbeck, D. & B. Johnen, 1976: Der Umsatz von Pflanzenwurzeln im Laufe der Vegetationsperiode und dessen Beitrag zur „Bodenatmung“. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 3, 315-328.

Schattauer, A. & P. Weiland, 2009: Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 4. Auflage, 25-35.

Scheffer, K., E. Pahmeyer & D. Szymanski, 1984: Der Einfluß der Saatzeit auf die Ertragsbildung von Mais, dargestellt an Versuchen mit Folienbedeckung. Kali-Briefe (Bünte-hof) 17 (2), 145-151.

Schindler, M., 1997: Wirtschaftlichkeit des Anbaus. In: Karpenstein-Machan, M., 1997: Energiepflanzenbau für Biogasbetreiber, DLG Verlag, Frankfurt.

Scheffer, K. & R. Stülpnagel, 1993: Wege und Chancen bei der Bereitstellung des CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträgers Biomasse – Grundgedanken zu einem neuen Forschungskonzept. Der Tropenlandwirt, Beiheft 49, 147-161.

Schmidt, L., F. Weißbach, K.D. Wernecke & E. Hein, 1971: Erarbeitung von Parametern für die Vorhersage und Steuerung des Gärverlaufes bei der Grünfuttersilierung, Forschungsbericht, Oskar-Kellner Institut für Tierernährung, Rostock.

Schröder, J.J., L. Ten Holte & B.H. Janssen: Non-overwintering cover crops: a significant source of N. Netherlands Journal of Agricultural Science 45, 231-248.

Schumacher, B., 2008: Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Bioethanol. Dissertation, Universität Hohenheim.

Schumacher, B., C. Böhmel, M. Mukengele, B. Pfeifer & H. Oechner, 2007: Raps und Zwischenfrüchte für die Biogasanlage. top agrar, Jahrbuch 2007, 34-36.

Slapunov, V.N. 1982: Promezutznye posevy v Belorussii. – Zemlede –.Moskwa 43 (1982) 32-34, zitiert aus: Klimanek, E.-M., 1987: Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Fruchtarten – wissenschaftliche Einzelveröffentlichung -. Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Müncheberg.

---

Sticksel, E., B. Eder, J. Eder, A. Aigner, G. Salzeder, G. Weber & A. Aigner, 2009: Optimierung von Biogasfruchtfolgen unter bayerischen Anbaubedingungen – Versuchsergebnisse des LfL. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe Heft 2, 51-58.

Sticksel, E., G. Salzeder, A. Aigner & J. Eder, 2009: Grünroggen als Winterzwischenfrucht zur Biogaszeugung. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 3, 497-500.

Strasburger, 2008: Lehrbuch der Botanik. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 36. Auflage.

Strauss, C., A. Vetter & A. Nehring, 2009: Fruchtfolgegestaltung für Biogas. *forum.new power*, Ausgabe 3, 4-7.

Stülpnagel, R., 1982: Schätzung der von Ackerbohnen symbiotisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 151, 446-458.

Stülpnagel, R., C. von Buttlar, F. Heuser & M. Wachendorf, 2009: Teilprojekt 6: Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet. Schlussbericht

[http://www.tll.de/vbp/eva1/uni\\_ks\\_tp6.pdf](http://www.tll.de/vbp/eva1/uni_ks_tp6.pdf),

besucht am 13. September 2010.

Stulen, I., L. Lanting, H. Lambers, F. Posthumus, S.J. van de Dijk & R. Hofstra, 1981: Nitrogen metabolism of *plantago lanceolata* as dependent on the supply of mineral nutrients. *Physiologia Plantarum* 51, 93-98.

Stute, J. K. & J. L. Posner, 1985: Legume cover crops as a nitrogen source for corn in an oat-corn rotation. *Journal of production agriculture* 8, 385-390.

Ta, T. C. & M. A. Faris, 1987: Species variation in the fixation and transfer of nitrogen from legumes to associated grasses. *Plant and Soil* 98, 265-274.

Thorup-Kristensen, K., 1994: The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertilizer Research* 37, 227-234.

Thorup-Kristensen, K., 2001: Are differences in root growth of nitrogen catch crops important for their ability to reduce soil nitrate-N content, and how can this be measured? *Plant and Soil* 230, 185-195.

Thorup-Kristensen, K., 2006: Effect of deep and shallow root systems on the dynamics of soil inorganic N during 3-year crop rotations. *Plant and Soil* 288, 233-248.

---

Thorup-Kristensen, K., J. Magid & L. S. Jensen, 2003: Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79, 227-302.

Torbert, H. A., D. W. Reeves & R. L. Mulvaney, 1996: Winter legume cover crop benefits to corn: rotation vs. fixed-nitrogen effects. *Agronomy Journal* 88, 527-535.

van Dam, A. M. & P. P. Leffelaar, 1998: Root, soil water and nitrogen dynamics in a catch crop – soil system in the Wageningen Rhizolab. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 46, 267-284.

van Soest, P. J., J. B. Robertson & B. A. Lewis, 1991: Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. Symposium: Carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 74, 3583-3597.

Vetter, A., 2009: Hirsen für Biogas gekonnt anbauen. *top agrar*, Heft 5, 68-70.

Vetter, A., 2010: Zwei Kulturen in der Vegetationszeit – der Energiepflanzenanbau macht es möglich. *Ackerplus* Heft 1, 78-82.

Vogler, S. 2010: Ertragreicher und umweltgerechter Biomasseanbau zur Biogaserzeugung am Beispiel des Zweikulturnutzungssystems. Masterarbeit Universität Kassel / Universität Göttingen.

Vos, J. & P. E. L. van der Putten, 1997: Field observations on nitrogen catch crops. I. Potential and actual growth and nitrogen accumulation in relation to sowing date and crop species. *Plant and Soil* 195, 299-309.

Vos, J, P.E.L. van der Putten, M.H. Hussein, A.M. van Dam & P.A. Leffelaar, 1998: Field observations on nitrogen catch crops II. Root length and root length distribution in relation to species and nitrogen supply. *Plant and Soil* 201, 149-155.

Vyn, T. J., J. G. Faber, K. J. Janovicek & E. G. Beauchamp, 2000: Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agronomy Journal* 92, 915-924.

Wachendorf, M., T. Fricke, R. Graß & R. Stülpnagel, 2007: Ein neues Konzept für die bioenergetische Nutzung von Grünlandbiomasse. *Neue Funktionen des Grünlands. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau*, Band 8. Referate und Poster der 51. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 165-168.

---

Waggoner, M. G., 1989a: Time of desiccation effects on plant composition and subsequent nitrogen release from several winter annual cover crops. *Agronomy Journal* 81, 236-241.

Waggoner, M. G., 1989b: Cover crop management and nitrogen rate in relation to growth and yield of no-till corn. *Agronomy Journal* 81, 533-538.

Waggoner, M.G., D.E. Kessel & S.J. Smith, 1985: Uniformity of nitrogen-15 enrichment in different plant parts and subsequent decomposition monitoring of labeled crop residues<sup>1</sup>. *Soil Science Society of America Journal* 49, 1205-1208.

Weiland, P., 2000: Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. Gölzower Fachgespräche. Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, 8-27.

Weiland, P., 2004: Biogas – eine neue Einkommensquelle für die Landwirtschaft. Forschungsreport. Verbraucherschutz – Ernährung – Landwirtschaft. Agrartechnik. (Heft 29), 16-19.

Weißbach, R., 1973: Methode und Tabellen zur Schätzung der Vergärbarkeit. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Landwirtschaftsausstellung der DDR, Markkleeberg.

Weißbach, F., 2003: Tabellen zur Schätzung der Vergärbarkeit von Grünfütter für die Silagebereitung – 47. Jahrestagung, 28. bis 30. August 2003 in Braunschweig unveröffentlicht, zitiert in: Pahlow, G., 2003: Konservierung von Fütterleguminosen. Mitteilungen Arbeitsgemeinschaft Grünland und Fütterbau 2003, Band 5, 23-29.

Weißbach, F., 2009: Die Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 3, 517-526.

Willms, M., J. Hufnagel, F. Reinicke, B. Wagner & C. v. Buttlar, 2009, Energiepflanzenanbau – Wirkungen auf Humusbilanz und Stickstoffhaushalt. 1-4.  
[http://eprints.dbges.de/405/1/2009\\_09\\_DBG\\_Bonn,\\_Willms\\_et\\_al.pdf](http://eprints.dbges.de/405/1/2009_09_DBG_Bonn,_Willms_et_al.pdf)  
besucht am 08. Februar 2010.

Wong, P. P., 1980: Nitrate and carbohydrate effects on nodulation and nitrogen fixation (acetylene reduction) activity of lentil (*Lens esculenta* Moench). *Plant Physiology* 66, 78-81.



---

## Anhang

Tabelle A 1: Spezifischer Methanertrag der Gemenge-Varianten, errechnet aus den spezifischen Methanerträgen der am jeweiligen Gemenge beteiligten Varianten in Reinsaat vom Mai 2008, gewichtet mit den Ertragsanteilen der Ernte im Mai 2008.

Variante	Spezifischer Methanertrag [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kgTM <sup>-1</sup> ]
28 GEM Wicken/Roggen	0,306
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	0,264
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	0,276
31 GEM Raps/Wegwarte	0,268
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	0,307
33 Landsberger Gemenge	0,296

Tabelle A 2: Methan-Flächenertrag der Winterzwischenfrüchte im Mai 2007 und 2008. Die aufgeführten Methanerträge wurden aus TM-Erträgen im Mai 2007 bzw. Mai 2008 und den spezifischen Methanerträgen der Prüfglieder im Mai 2008 berechnet.

Variante	Methan-Ertrag Mai 07 [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> ]	Methan-Ertrag Mai 08 [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> ]
01 Deutsches Weidelgras	2295	1225
02 Welsches Weidelgras	2713	2171
03 Bastard-Weidelgras	2650	2167
04 Knaulgras	2155	942
05 Winterroggen "Vitallo"	3289	1414
06 Winterroggen "Recrut"	3260	1014
07 Winterroggen "Carotrumpf"	3135	918
08 Winterroggen "Resonanz"	2825	1093
09 Wintergerste "Ludmilla"	3078	1071
10 Wintergerste "Dorothea"	2040	721
11 Wintergerste "Reni"	2496	899
12 Wintergerste "Mombasa"	2448	749
13 Wintertriticale	2833	763
14 Winterraps "Mikonos"	1390	926
15 Winterraps "Oase"	1837	1465
16 Winterraps "Talent"	1784	1545
17 Winterraps "Becker"	1486	1186
18 Winterrübsen	1367	1958
19 Markstammkohl	2403	1392
20 Wegwarte	1400	967
21 Spitzwegerich	1698	991
22 Winterackerbohnen	2347	680
23 Wintererbsen	1457	1009
24 Zottelwicken	1256	1289
25 Gelber Steinklee	946	333
26 Rotklee	1511	1832
27 Inkarnatklee	2557	2364
28 GEM Wicken/Roggen	2910	2235
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	2178	1110
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	1523	1560
31 GEM Raps/Wegwarte	1789	952
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	2941	791
33 Landsberger Gemenge	3009	2667

Tabelle A 3: Methan-Flächenerträge des Energiemaisses im November 2007 und 2008 nach verschiedenen Vorfrüchten. Die aufgeführten Methanerträge wurden aus den TM-Erträgen des Mais und einem pauschalen spezifischen Methanertrag von 0,321 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg TM<sup>-1</sup> (Döhler et al. 2009) berechnet.

Variante	Methan-Ertrag Nov 07 [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> ]	Methan-Ertrag Nov 08 [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> ]
01 Deutsches Weidelgras	2325	1291
02 Welsches Weidelgras	3083	1446
03 Bastard-Weidelgras	2566	1352
04 Knaulgras	3382	2428
05 Winterroggen "Vitallo"	3437	2610
06 Winterroggen "Recrut"	3508	2743
07 Winterroggen "Carotrumpf"	3801	2799
08 Winterroggen "Resonanz"	3812	2681
09 Wintergerste "Ludmilla"	3570	2729
10 Wintergerste "Dorothea"	3721	2643
11 Wintergerste "Reni"	4010	2750
12 Wintergerste "Mombasa"	4272	2812
13 Wintertriticale	3462	2769
14 Winterraps "Mikonos"	4280	3390
15 Winterraps "Oase"	4405	3104
16 Winterraps "Talent"	4152	3180
17 Winterraps "Becker"	4170	3632
18 Winterrübsen	4567	3157
19 Markstammkohl	4030	3009
20 Wegwarte	3707	1941
21 Spitzwegerich	2426	1473
22 Winterackerbohnen	4913	3944
23 Wintererbsen	4777	3973
24 Zottelwicken	5071	4710
25 Gelber Steinklee	4710	3828
26 Rotklee	4576	4685
27 Inkarnatklee	4817	4032
28 GEM Wicken/Roggen	3906	3980
29 GEM Ackerbohnen/Erbsen	5147	3488
30 GEM Rübsen/Markstammkohl	4048	3044
31 GEM Raps/Wegwarte	4374	2849
32 GEM Triticale/Spitzwegerich	4145	2937
33 Landsberger Gemenge	3526	2002
34 Schwarzbrache	5281	4358

---

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Rolf Rauber. Überaus hilfreich waren die methodischen Anregungen bei der Durchführung und Bewertung der Versuche, aber auch die begleitenden Diskussionen und Anmerkungen bei der Fertigstellung der wissenschaftlichen Arbeit.

Danken möchte ich Herrn Professor Dr. Johannes Isselstein für die Übernahme des Korreferates.

Herzlich danken möchte ich allen, die bei der Durchführung der Versuche tatkräftig mitgeholfen haben, insbesondere:

- Frau Anita Bartlitz
- Frau Kerstin Jespersen
- Herrn Dr. Rüdiger Jung
- Frau Gabriele Kollé
- Frau Christiane Münter
- Herrn Thomas Seibold

und dem Feldpersonal des Instituts für Pflanzenbau, Pflanzenzüchtung und Graslandwissenschaft. Speziell die Beprobungen und Probenaufbereitung während der Wintermonate waren oft sehr beschwerlich und wären ohne Unterstützung des Feldpersonals nicht möglich gewesen.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt danke ich für die finanzielle Förderung des Projektes.



---

## Lebenslauf

### Personalien

Christian Antonius Menke  
geboren am 20. Dezember 1963 in Hiltrup  
(jetzt Münster, Nordrhein-Westfalen)  
verheiratet, zwei Kinder

### Ausbildung

seit 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Pflanzenbau der Universität Göttingen
1989 – 1992	Studium der Agrarwissenschaften an der Universität Göttingen Abschluss: Dipl.-Ing. agr.
1988 – 1989	Auslandspraktika in den Niederlanden, der Schweiz und Frankreich
1986 – 1988	Studium der Agrarwissenschaften an der Universität Göttingen Abschluss: Vordiplom
1984 – 1986	Landwirtschaftliche Ausbildung Abschluss: Landwirt
bis 1983	Besuch des Wilhelm-Hittorf-Gymnasiums in Münster Abschluss: Abitur





