

Optimierung der Trockenmassebildung von Winterzwischenfrüchten und der Nmin-Absenkung über Winter vor Mais zur Biogasnutzung

Abschlussbericht

Az 24997

Georg-August-Universität Göttingen

Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Abteilung Pflanzenbau

Prof. Dr. Rolf Rauber
Dipl.-Ing. agr. Christian Menke

Von-Siebold-Straße 8
37075 Göttingen

rrauber@uni-goettingen.de
cmenke@uni-goettingen.de

Göttingen im Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung.....	3
2 Material und Methoden	4
2.1 Witterung im Versuchszeitraum.....	4
2.2 Versuchsanlage	6
2.3 Erfassung von Wurzeldaten	8
2.4 Berechnung des Indexes der relativen Anbauwürdigkeit (I_{RA}) der geprüften Varianten.....	9
2.4.1 Nmin-Index.....	9
2.4.2 Winterzwischenfrucht-Index	9
2.4.3 Energiemais-Index	10
2.4.4 Gesamtindex I_{RA}	10
3 Ergebnisse.....	11
3.1 Nmin-Absenkung zum Vegetationsende.....	11
3.2 Wurzellängendichte (WLD) der Winterzwischenfrüchte im Dezember	13
3.3 Trockenmasse-Erträge der Winterzwischenfrüchte	15
3.4 Methan-Flächenerträge	17
3.5 Erntemenge des Energiemaisses.....	19
3.6 Index (I_{RA}) der relativen Anbauwürdigkeit von Winterzwischenfrüchten	21
4 Fazit.....	25

1 Einleitung

Die Förderung der regenerativen Energie in Deutschland führte in den letzten Jahren zu einer zunehmenden Inbetriebnahme von Biogasanlagen. Hier werden organische Substanzen durch Methan bildende Bakterien vergoren. Durch Verbrennung des gebildeten Methans kann anschließend Wärme und elektrische Energie erzeugt werden.

Zur Steigerung der Gasausbeute werden in diesen Anlagen häufig hochwertige pflanzliche Rohstoffe als Koferment zugesetzt. Durch die zunehmende Anzahl von Biogasanlagen steigt der Bedarf an vergärbarem Pflanzenmaterial, für dessen Produktion landwirtschaftliche Flächen benötigt werden, die folglich nicht mehr für die Erzeugung von Futter- und Nahrungsmitteln zur Verfügung stehen. Ein Wettbewerb um die begrenzte Flächenkapazität ist zu erwarten.

Daher erscheint es notwendig, die Effizienz im Energiepflanzenanbau, der bislang durch den Anbau von Mais dominiert wird, zu verbessern. Als Vorzüge des Mais werden häufig seine Ertragsicherheit und die ausgereifte Anbau- und Erntetechnik genannt. Allerdings ist der Anbau von Mais nicht ohne ökologische Bedenken. So sind die landwirtschaftlichen Flächen insbesondere in der Zeitspanne nach der Ernte der vorherigen Hauptfrucht bis zur Bestellung des Mais häufig ohne Pflanzenbewuchs und somit unter anderem der Gefahr einer Verlagerung von Nährstoffen, insbesondere Stickstoff, durch winterliche Niederschläge ausgesetzt. Eine Möglichkeit, die Effizienz und Nachhaltigkeit des Energiemaisanbaus zu verbessern wird darin gesehen, vor Mais Winterzwischenfrüchte anzubauen.

Es war Ziel unserer Untersuchungen herauszufinden, welche Winterzwischenfrüchte

- mineralisierten Stickstoff im Herbst binden und dadurch eine Verlagerung in tiefere Bodenschichten oder gar ins Grundwasser vermindern können,
- in der Lage sind, im Winterhalbjahr weitere Biomasse zu produzieren, um diese in Biogasanlagen energetisch nutzen zu können,
- eine günstige Vorfruchtwirkung auf den nachfolgenden Mais zeigen.

Auf Grund der vergleichsweise starken Berücksichtigung der N_{min}-Absenkung durch die Zwischenfrüchte über Winter sind die Untersuchungen nicht nur relevant für den Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung, sondern auch für die Auflagen seitens der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie.

2 Material und Methoden

Im Versuch wurden winterharte Pflanzenarten aus verschiedenen Pflanzenfamilien geprüft. Die Aussaat der Winterzwischenfrüchte wurde zu zwei Terminen im Herbst vorgenommen, die den praxisüblichen Saatterminen der Arten entsprachen. Über Winter wurden insbesondere die Entwicklung der Nmin-Werte im Boden ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) sowie der unter- und oberirdischen Biomasse erfasst. Nach dem Umbruch der Winterzwischenfrüchte wurde Energiemais angebaut.

Die Feldversuche wurden auf den Flächen des Versuchsgutes „Reinshof“ der Universität Göttingen in den Jahren 2006/2007 und 2007/2008 durchgeführt. Der Reinshof liegt südlich von Göttingen, etwa 4 km vom Zentrum.

Der Versuch wurde in beiden Versuchsjahren auf tiefgründigen Lössböden durchgeführt. Die Analyse des Oberbodens zu Versuchsbeginn ergab mittlere Versorgungsstufen der Makronährstoffe in einem schwach alkalischen bzw. schwach sauren Boden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bodenkennwerte der beiden Versuchsstandorte zu Versuchsbeginn

Versuchsjahr	Bo-den-art	C _{org} [%]	Ge-samt N [%]	C/N	Hu-mus [%]	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

2.1 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 des ersten Versuchsjahres wichen deutlich von den Werten des langjährigen Mittels ab (Abbildung 1). Im September 2006 fielen nur 6 mm Niederschlag; im Januar hingegen war die Niederschlagsmenge größer als im langjährigen Mittel. Im April 2007 fiel erneut nur sehr geringer Niederschlag (3,1 mm), von Mai bis September 2007 fielen in jedem Monat höhere Niederschlagsmengen als im langjährigen Mittel.

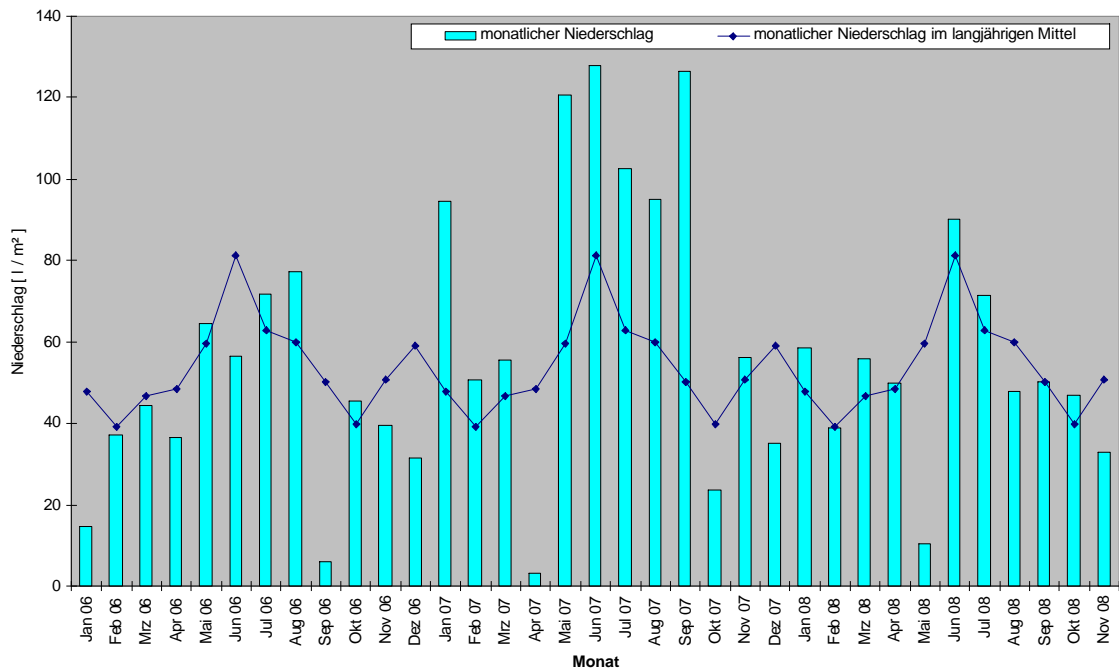


Abbildung 1: Niederschlag als Monatssummen im Versuchszeitraum und im langjährigen Mittel.

Die Niederschlagsmengen des zweiten Versuchsjahres 2007/2008 waren gekennzeichnet durch hohe Niederschläge im August und September 2007 und sehr geringe Niederschläge im Monat Mai 2008 (10 mm).

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 gab es nicht. 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 $0,7\text{ °C}$ im Oktober 2007). Die Wintermonate (Dezember 2007, Januar, Februar und März 2008) waren auch in diesem Versuchsjahr überdurchschnittlich warm (Abbildung 2). Im zweiten Versuchsjahr betrug die geringste Lufttemperatur im 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.

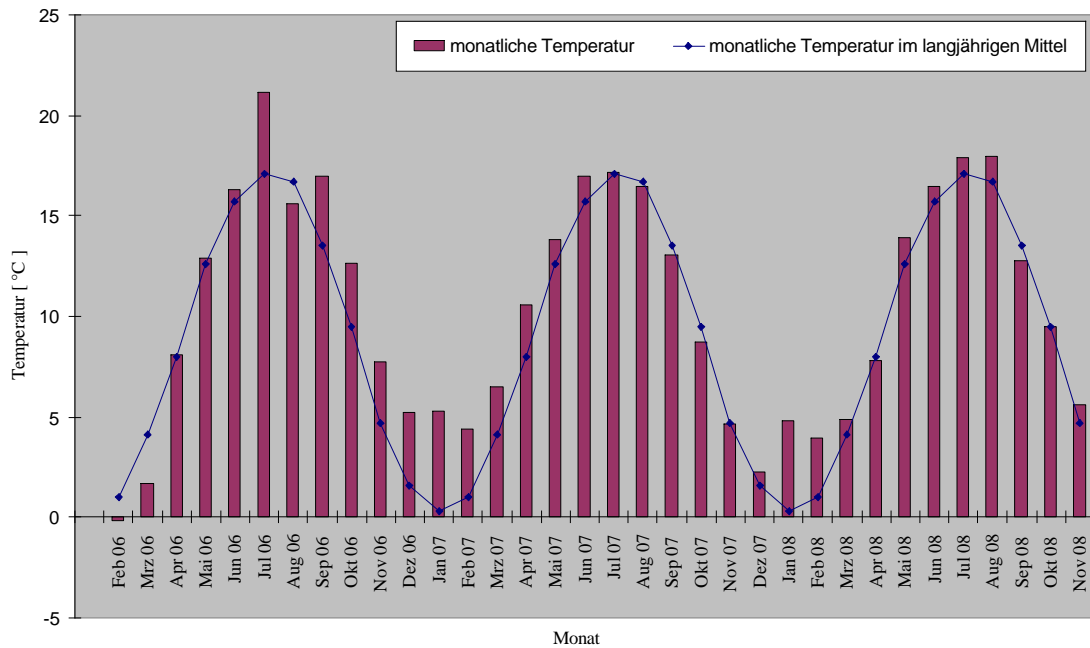


Abbildung 2: Monatliche Mittelwerte der Lufttemperatur im Versuchszeitraum und Lufttemperaturen im langjährigen Mittel.

2.2 Versuchsanlage

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. Das Design des Versuches war ein Lateinisches Rechteck mit vier Wiederholungen. Die insgesamt 39 Varianten wurden zu dreimal je 10 Varianten und einmal 9 Varianten geblockt. Ausgesät wurde zu zwei verschiedenen Terminen (Tabelle 2). Die Aussaat von Futtergräsern, Kreuzblütlern, Kräutern und kleinkörnigen Leguminosen erfolgte Mitte August (17.08.2006 bzw. 13.08.2007). Im ersten Versuchsjahr wurde die späte Aussaat am 25.09.2006 durchgeführt. Im zweiten Versuchsjahr ergab sich bei der späten Aussaat aufgrund fortwährenden Regens eine Verzögerung, sodass hier die späte Saat erst am 17.10.2007 erfolgen konnte.

Zur Vermeidung einer N-Immobilisierung durch die eingearbeiteten Strohreste der Vorkultur wurde nach der Aussaat eine N-Ausgleichsgabe von 30 kg N ha^{-1} ausgebracht. Zur Unkrautregulierung wurde in beiden Jahren zweimal mit der Handhacke gehackt; chemische Präparate zur Unkrautbekämpfung wurden nicht eingesetzt. Gegen Schneckenfraß wurde bei Auftreten von ersten Nacktschnecken 3 kg ha^{-1} eines Molluskizides (METAREX, Wirkstoff: 49 g kg^{-1} Metaldehyd) ausgebracht.

Tabelle 2: Liste der Winterzwischenfrucht-Varianten. Die farbige Markierung der Varianten wird in den nachfolgenden Abbildungen beibehalten.

Nr.	Variante	Botanische Bezeichnung	Sorte bzw. Linie	Aus- saat
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	Knauelgras	<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>	Dorothea	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“ ¹	F
18	Winterrübsen	<i>Brassica campestris</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>	Handelssaatgut	F
22	Winterackerbohne	<i>Vicia faba</i>	WAB 98-21 ²	S
23	Wintererbse	<i>Pisum sativum</i>	EFB 33	S
24	Zottelwicke	<i>Vicia villosa</i>	Otsaat	F
25	Gelber Steinklee	<i>Melilotus officinalis</i>	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 ² EFB 33	 S
30	Gemenge Rübsen/Markstammkohl	<i>Brassica campestris</i> <i>Brassica oleracea</i>	Lenox Markola	 F
31	Gemenge Winterraps/Wegwarte	<i>Brassica napus</i> <i>Cichorium intybus</i>	„Becker“ ¹ 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			
35	Deutsches Weidelgras	<i>Lolium perenne</i>	Loporello	F
36	Winterroggen	<i>Secale cereale</i>	Vitallo	S
37	Winterraps	<i>Brassica napus</i>	Mikonos	F
38	Wintererbse	<i>Pisum sativum</i>	EFB 33	S
39	Landsberger Gemenge Welsches Weidelgras/ Zottelwicke/ Inkarnatklee	<i>Lolium multiflorum</i> <i>Vicia villosa</i> <i>Trifolium incarnatum</i>	Gisel Otsaat Linkarus	 F

¹ Zuchtlinie von Professor Becker, Göttingen; ² 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). Die Varianten 35 bis 39 wurden für den nachfolgenden Gärrest-Düngeversuch angelegt.

Nach der letzten Beprobung der Winterzwischenfrüchte wurde der noch verbliebene Aufwuchs 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“ (gebeizt, S 280, Firma KWS SAAT AG) mit einer Saatstärke von 13 Körnern je m² in Reihenweiten von 0,75 m ausgesät. Eine Düngung zum Mais erfolgte lediglich bei den Varianten 35 bis 39 durch Ausbringen von Gärresten einer Biogasanlage, die übrigen Varianten wurden nicht gedüngt. Im ersten Versuchsjahr (Mai 2007) wurden 5,3 l m⁻², im zweiten Versuchsjahr (Mai 2008) 5 l m⁻² Gärrest ausgebracht, dieses entsprach etwa 175 bzw. 106 kg mineralischem N je Hektar. Die Unkrautbekämpfung im Mais erfolgte praxisüblich mit Herbiziden.

Tabelle 3: Termine der Beprobungen

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

2.3 Erfassung von Wurzeldaten

Die Entnahme von Wurzelproben wurde mit Rammkernsonden (Zylinderdurchmesser 8,7 cm) durchgeführt. Auf jeder Parzelle erfolgten ein Einstich auf der Pflanzenreihe und ein Einstich zwischen zwei Pflanzenreihen. Es 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. Die Separation von Boden und Wurzeln erfolgte mittels einer Wurzelwaschanlage und anschließendem Herauslesen von Fremdmaterial.

Zur Ermittlung der Wurzellängen wurden die Wurzeln eingescannt und mit dem Computerprogramm WinRHIZO automatisch vermessen. Die ermittelten Wurzellängen aus den Einstichen auf bzw. zwischen zwei Pflanzenreihen wurden auf das Volumen des

Probenzylinders bezogen, um die Wurzellängendichte (WLD) zu bestimmen, angegeben in cm Wurzel je cm³ Boden (cm cm⁻³). Die nachfolgend genannten Wurzellängendichten beziehen sich auf Mittelwerte der Einstiche „auf der Reihe“ und „zwischen zwei Reihen“.

2.4 Berechnung des Indexes der relativen Anbauwürdigkeit (I_{RA}) der geprüften Varianten

Zur Verknüpfung von Ergebnissen zur Absenkung der N_{min}-Werte im Dezember sowie der Methanerträge der Winterzwischenfrüchte und der TM-Erträge des Energiemaisses wurden Indizes der genannten Parameter errechnet. Für die Berechnung des „Index der relativen Anbauwürdigkeit“ jeder geprüften Variante wurden die Indizes der Teilaspekte N_{min}-Absenkung, Methan-Flächenertrag und Maisertrag verknüpft. Dabei wurden Datensätze der Varianten 1 bis 33 berücksichtigt.

2.4.1 N_{min}-Index

Der N_{min}-Index beschreibt die Differenz des N_{min}-Wertes der geprüften Variante im Dezember zum mittleren N_{min}-Wert über alle Varianten im Dezember.

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

wobei

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

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

bedeuten.

Wenn der N_{min}-Wert einer Variante kleiner ist als der Mittelwert aller Varianten, dann liegt der Index_{N_{min}} zwischen dem Wert 0 und dem höchstmöglichen Wert 1. Liegt der N_{min}-Wert einer Variante oberhalb des Mittelwertes aller Varianten führt dies zu negativen Indizes, so würde z.B. ein dreimal höherer N_{min}-Wert als der Mittelwert aller Varianten zu dem Index_{N_{min}} von -2 führen.

2.4.2 Winterzwischenfrucht-Index

Der Winterzwischenfrucht-Index basiert auf dem Methan-Flächenertrag der Winterzwischenfrüchte im Monat Mai. Die Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte wurden durch Ermittlung der spezifischen Methanerträge (Nm³ CH₄ kg⁻¹ TM) von Pflanzenmaterial aus der Ernte 2008 mit Hilfe des „Hohenheimer Biogasertragstests“ ermittelt und mit den Trockenmasse-Erträgen der Erntetermine im Mai 2007 bzw. Mai 2008 zu den Methan-Flächenerträgen je Hektar verrechnet.

Es wurde der Methan-Flächenertrag jeder Variante in Beziehung gesetzt zum mittleren Methan-Flächenertrag aller geprüften Varianten im Mai.

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

wobei

$$Y_{\text{Methan}} = \text{Methan-Flächenertrag der Variante im Mai [Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{]}$$

$$\bar{Y}_{\text{Methan}} = \text{arithmetischer Mittelwert der Methan-Flächenerträge aller Varianten im Mai [Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}\text{]}$$

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.

2.4.3 Energiemais-Index

Der Energiemais-Index wurde berechnet, indem der TM-Ertrag des Maises jeder Variante ins Verhältnis zum mittleren Maisertrag aller geprüften Varianten gesetzt wurde. Die Index-Werte der Varianten wurden nach folgender Formel berechnet:

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

wobei

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

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

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.

2.4.4 Gesamtindex I_{RA}

Die errechneten drei Indizes wurden anschließend zu einem Gesamtindex I_{RA} addiert:

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

Da die drei Indizes einer Variante jeweils 0 sind wenn sie genau dem Mittelwert über alle Varianten entsprechen, ist somit deren Gesamtindex I_{RA} ebenfalls gleich 0. Ein geringerer Nmin-Wert, bzw. höhere Methan- oder Maiserträge führen zu einem höheren Gesamtindex I_{RA} .

3 Ergebnisse

3.1 Nmin-Absenkung zum Vegetationsende

Erstes Versuchsjahr

Die Bestimmung der Mengen mineralisierten Stickstoffs im Boden (0 – 90 cm) ergab für den Monat Dezember 2006 geringe Nmin-Werte bei den Kreuzblütlern sowie den Gemengen mit Kreuzblütlern als Gemengepartner (Abbildung 3). Winterraps (Sorte „Mikonos“) wies im Dezember 2006 mit 15,3 kg Nmin ha⁻¹ den geringsten Nmin-Wert auf. Geringe Nmin-Werte wurden des Weiteren bei Futtergräsern, kleinkörnigen Leguminosen sowie Kräutern gemessen. Höchste Nmin-Werte offenbarten hingegen die großkörnigen Leguminosen, Winterackerbohnen und Wintererbsen; diese lagen noch über den Nmin-Werten der Schwarzbrache (99 kg Nmin ha⁻¹). Die Getreide-Varianten konnten den Nmin-Wert bis zum Dezember nicht wesentlich absenken; die Werte lagen zwischen 60 kg Nmin ha⁻¹ (Wintergerste, Sorte „Mombasa“) und 96 kg Nmin ha⁻¹ (Winterroggen, Sorte „Recrut“).

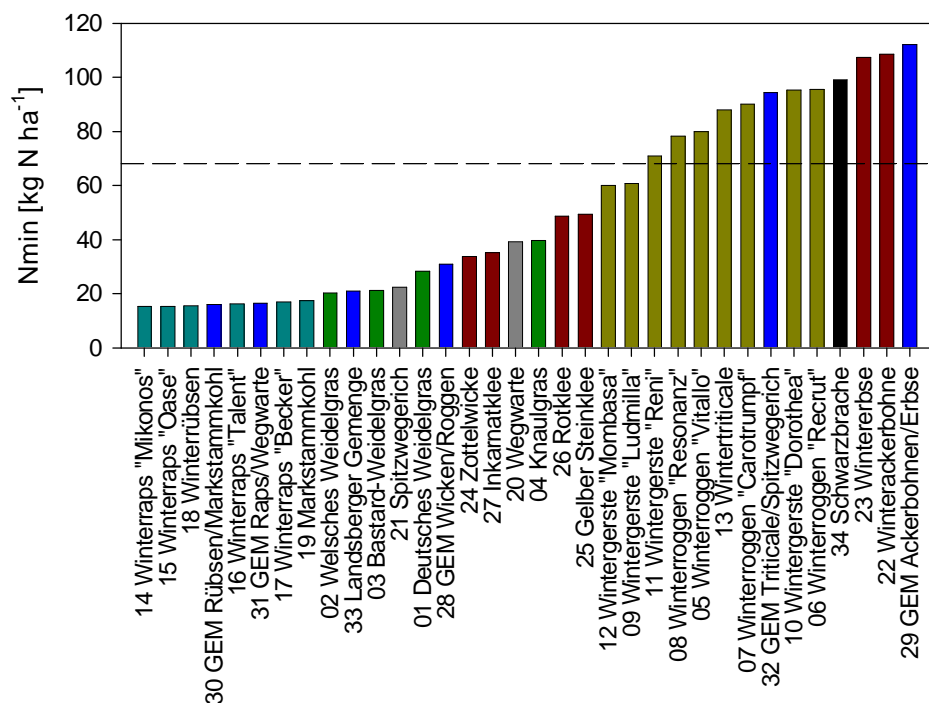


Abbildung 3: Nmin-Werte im Dezember 2006. Die gestrichelte Linie stellt den mittleren Nmin-Wert zur Aussaat der Winterzwischenfrüchte dar (0 – 90 cm).

Zweites Versuchsjahr

Die geringsten N_{min}-Werte im Dezember 2007 wurden bei den Futtergräsern und den Kreuzblütlern gemessen (Abbildung 4). Mit 3,8 kg N_{min} ha⁻¹ wurde bei Bastard-Weidelgras der geringste N_{min}-Wert gemessen. Auch Spitzwegerich und das Landsberger Gemenge zeigten geringe N_{min}-Werte. Die kleinkörnigen Leguminosen hatten geringere N_{min}-Werte als die Getreide-Varianten und die großkörnigen Leguminosen. Die höchsten Werte wurden bei Winterackerbohnen mit 37 und bei der Schwarzbrache mit 39 kg N_{min} ha⁻¹ gemessen.

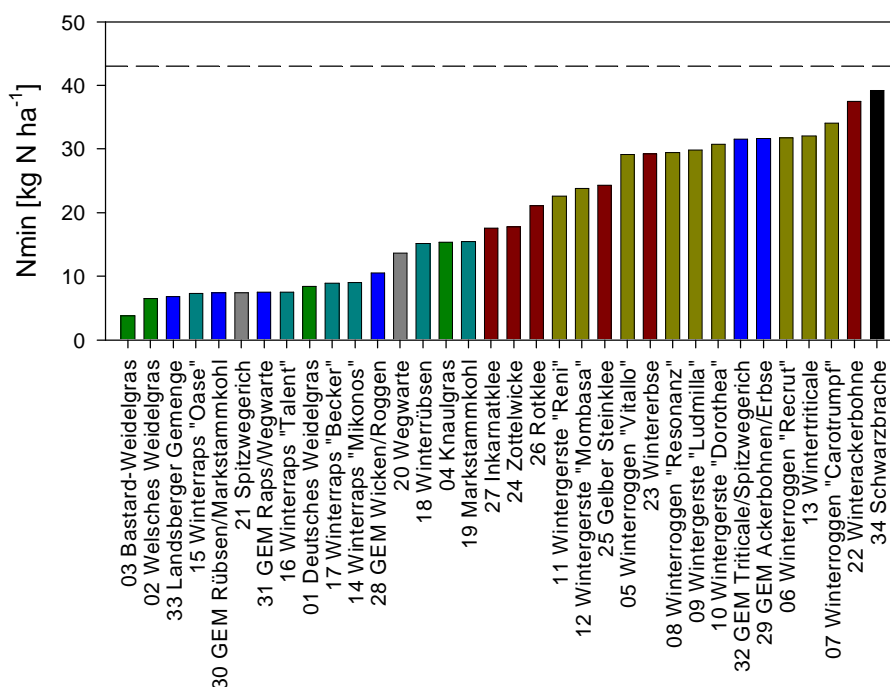


Abbildung 4: N_{min}-Werte im Dezember 2007. Die gestrichelte Linie stellt den mittleren N_{min}-Wert zur Aussaat der Winterzwischenfrüchte dar (0 – 90 cm).

Die N_{min}-Werte des ersten Versuchsjahres lagen deutlich über dem Niveau des zweiten Jahres. Vermutlich ist dieses auf die warme Witterung im Herbst und Winter des Jahres 2006/07 (Abbildung 2), und demzufolge einer starken Stickstoffmineralisation im Boden, zurückzuführen.

3.2 Wurzellängendichte (WLD) der Winterzwischenfrüchte im Dezember

Die WLD der Winterzwischenfrüchte waren zu den Dezemberterminen außerordentlich verschieden. In beiden Versuchsjahren lagen die kleinsten und größten WLD um einen Faktor größer 60 auseinander.

Erstes Versuchsjahr

Die höchste WLD im Dezember 2006 wurde bei den Futtergräsern gemessen (Abbildung 5). Welsches Weidelgras ($6,5 \text{ cm cm}^{-3}$) und Bastard-Weidelgras ($5,1 \text{ cm cm}^{-3}$) erzielten die höchsten Werte. Des Weiteren zeigten Wickroggen und das Landsberger Gemenge sowie das Deutsche Weidelgras und Knaulgras hohe WLD. Deutlich geringere WLD waren bei den Kreuzblütlern zu beobachten. Bei den Getreidevarianten waren die WLD nochmals etwas kleiner. Die geringsten WLD wiesen der Gelbe Steinklee und die Winterackerbohnen ($0,12 \text{ cm cm}^{-3}$) sowie die Wintererbsen ($0,10 \text{ cm cm}^{-3}$) auf.

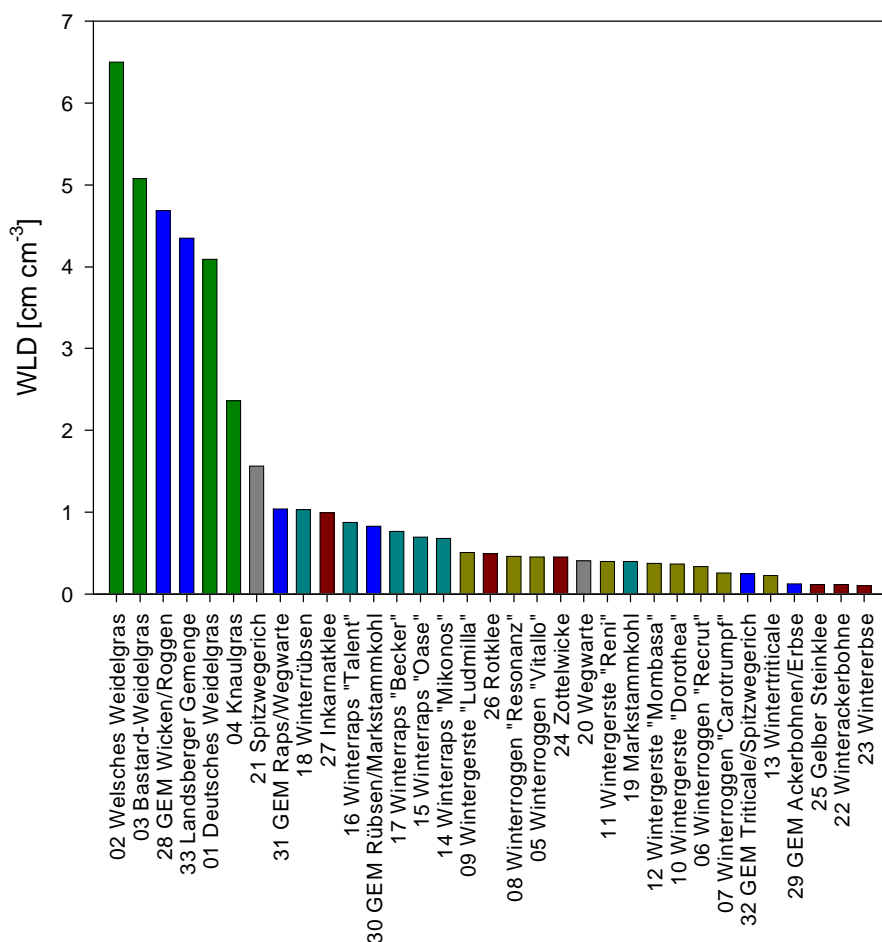


Abbildung 5: Wurzellängendichte im Dezember 2006 in der Bodenschicht von 0 bis 30 cm.

Zweites Versuchsjahr

Im Dezember 2007 zeigten Welsches Weidelgras ($9,9 \text{ cm cm}^{-3}$), Deutsches Weidelgras ($9,1 \text{ cm cm}^{-3}$), Bastard-Weidelgras ($8,2 \text{ cm cm}^{-3}$) sowie das Landsberger Gemenge ($6,5 \text{ cm cm}^{-3}$) die höchsten WLD (Abbildung 6). Die WLD von Wickroggen und Spitzwegerich lagen leicht über den WLD der Kreuzblütler. Sehr geringe Werte wurden im zweiten Versuchsjahr bei den witterungsbedingt verspätet ausgesäten Getreide-Varianten ($0,14 \text{ cm cm}^{-3}$) und bei den großkörnigen Leguminosen ($0,07 \text{ cm cm}^{-3}$) ermittelt.

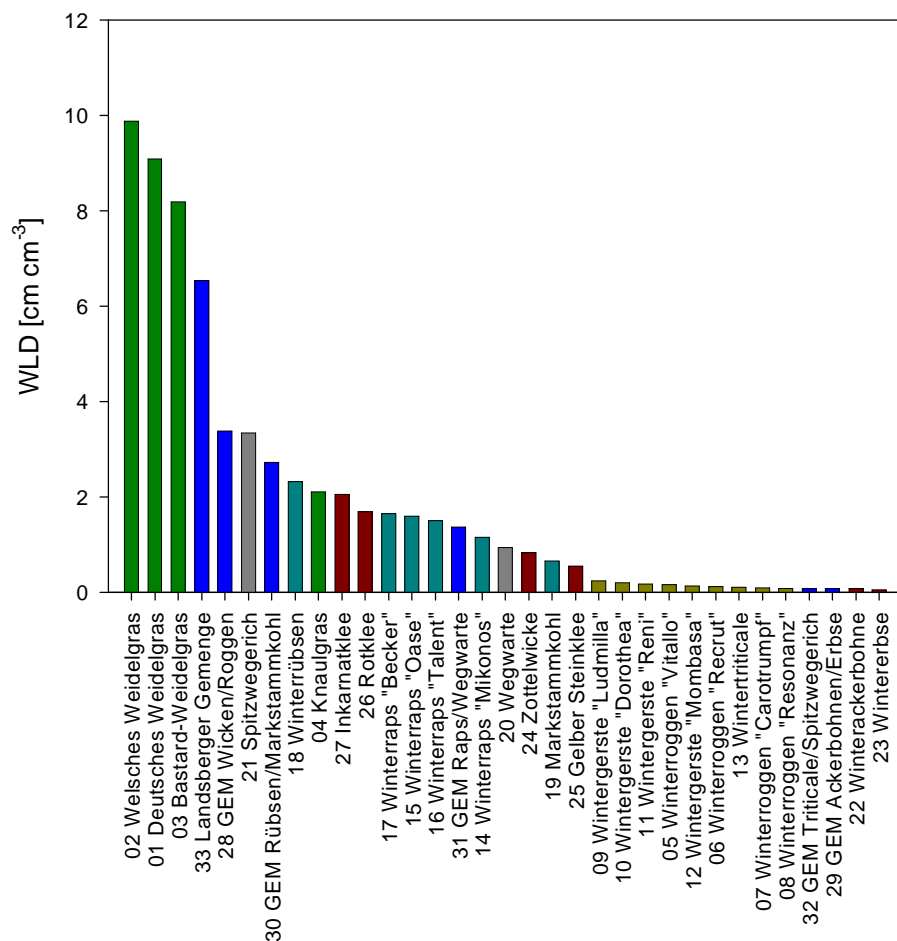


Abbildung 6: Wurzellängendichte im Dezember 2007 in der Bodenschicht von 0 bis 30 cm.

Die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zwischen den Nmin-Werten im Dezember und den WLD im Dezember ergab für das erste Versuchsjahr den Wert $r = -0,418$ ($n = 132$; $P < 0,001$). Im zweiten Versuchsjahr betrug der Korrelationskoeffizient $r = -0,476$ ($n = 132$; $P < 0,001$). Die Korrelationskoeffizienten deuten darauf hin, dass Pflanzen mit hohen WLD die Nmin-Werte stärker absenkten konnten. Allerdings kann die WLD – trotz hoher Signifikanzen – bei Weitem nicht alle Unterschiede hinsichtlich der Nmin-Absenkungen erklären. Ausschlaggebend dafür ist, dass auch einige Varianten mit vergleichsweise geringen WLD, z.B. die Kreuzblütler, eine wirksame Nmin-Absenkung herbeiführten.

3.3 Trockenmasse-Erträge der Winterzwischenfrüchte

Erstes Versuchsjahr

Mit dem Anbau von Wintergetreide und von Gemengen mit Wintergetreide als Gemegepartner wurden im ersten Versuchsjahr die höchsten Trockenmasse-Erträge erzielt (Abbildung 7). Ebenfalls unter den ertragsstarken Varianten waren Inkarnatklee und das Landsberger Gemenge. Geringe Erträge erbrachten Winterrübsen, Zottelwicke und insbesondere Gelber Steinklee.

Die Erträge der Kreuzblütler lagen im April noch im oberen Ertragsbereich, konnten aber im letzten Versuchsabschnitt vom 16. April bis zum 21. Mai 2007 nicht mehr so viel Biomasse hinzugewinnen wie die übrigen Varianten; insbesondere die Getreide-Varianten konnten in der genannten Spanne ihren Ertrag z. T. verdoppeln.

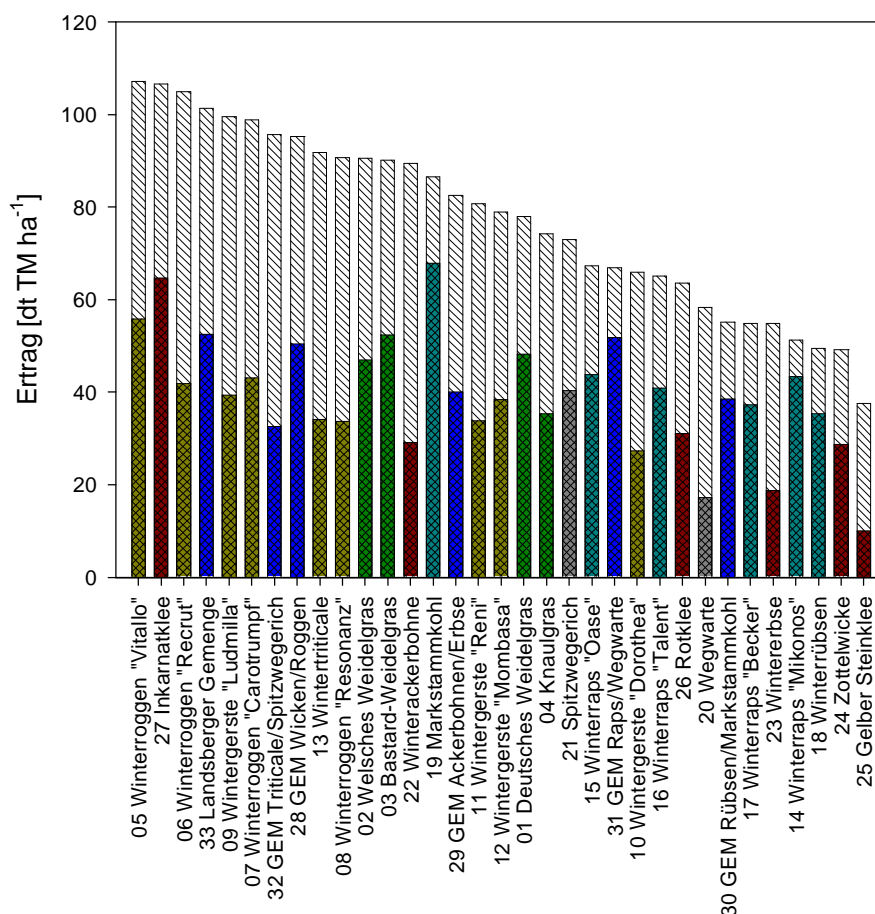


Abbildung 7: Trockenmasse-Erträge der Winterzwischenfrüchte im Mai 2007. Der untere, farbige Säulenabschnitt stellt den TM-Ertrag im April 2007, die Gesamtsäule den TM-Ertrag im Mai 2007 dar.

Die höchsten Wachstumsraten zwischen der April- und Maierte erzielt der Winterroggen (Sorte „Recrut“) sowie das Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich mit je-

weils $18 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Die geringste Wachstumsrate mit $2 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ war bei Winter-
raps (Sorte „Mikonos“) zu beobachten.

Zweites Versuchsjahr

Ertragsstärkste Varianten des zweiten Versuchsjahres waren Inkarnatklee und das Landsberger Gemenge sowie Rotklee und das Gemenge aus Wicken und Roggen. Somit sind die vier ertragsstärksten Varianten Leguminosen oder Gemenge mit einer Leguminose als Gemengepartner (Abbildung 8). Ertragsschwache Varianten waren im zweiten Versuchsjahr die verspätet ausgesäten Getreide-Varianten und wiederum Gelber Steinklee. Höchste Ertragszuwächse in der Zeitspanne vom 16. April bis zum 20. Mai 2008 konnten das Landsberger Gemenge ($44,7 \text{ dt TM ha}^{-1}$) und Bastard-Weidel-

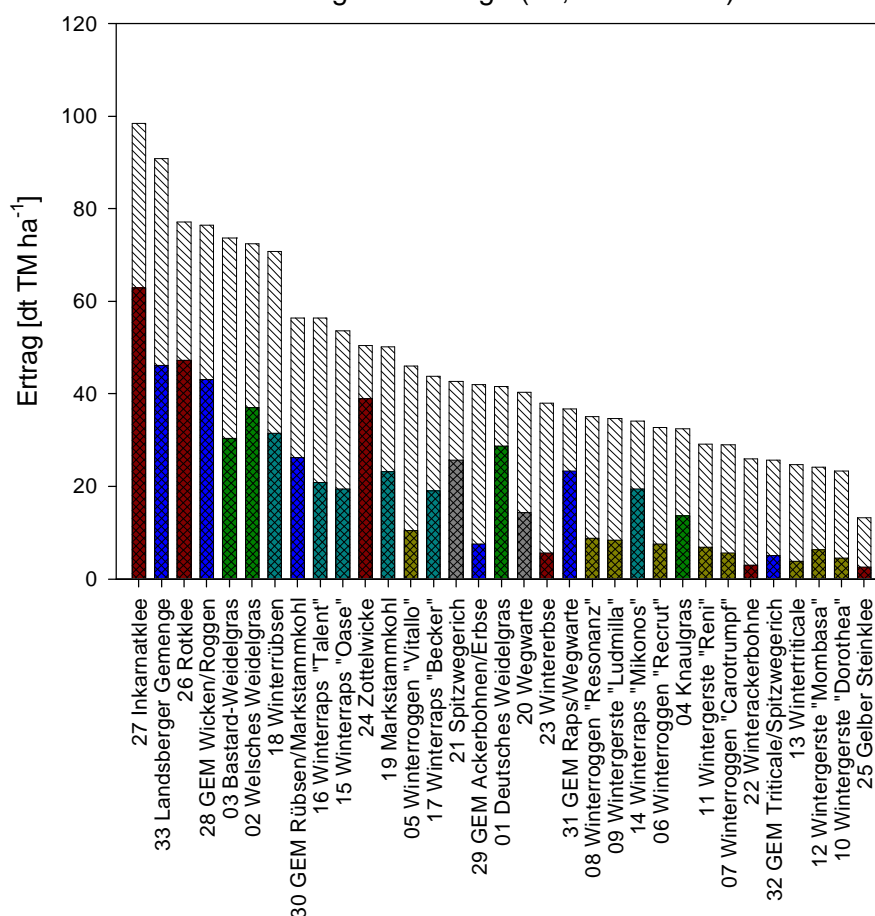


Abbildung 8: Trockenmasse-Erträge der Winterzwischenfrüchte im Mai 2008. Der untere, farbige Säulenabschnitt stellt den TM-Ertrag im April 2008, die Gesamtsäule den TM-Ertrag im Mai 2008 dar.

gras ($43,3 \text{ dt TM ha}^{-1}$) erzielen. Auch viele Getreide-Varianten konnten von April bis zum Mai 2008 den Biomasse-Ertrag mehr als verdoppeln. Mit $13 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ konnte das Landsberger Gemenge die höchste Wachstumsrate zwischen den Ernten im April und Mai erzielen. Die geringsten Wachstumsraten erzielten Deutsches Weidelgras ($4 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) und Gelber Steinklee ($3 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Die höheren Wachstumsraten des ersten Versuchsjahres sind vermutlich aufgrund der wärmeren Witterung im Frühjahr 2007 erzielt worden (Abbildung 2).

3.4 Methan-Flächenerträge

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Methan-Flächenertrag ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) und dem spezifischen Methanertrag ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ TM}$) der Winterzwischenfrüchte lag bei $r = -0,147$ ($n = 108$; n.s.). Dagegen lag der Korrelationskoeffizient zwischen dem Methan-Flächenertrag und dem Trockenmasseertrag (dt TM ha^{-1}) der Winterzwischenfrüchte bei $0,978$ ($n = 108$; $P < 0,001$). Das heißt, dass der Methan-Flächenertrag weitestgehend durch den Trockenmasseertrag der Zwischenfrüchte bestimmt wurde.

Erstes Versuchsjahr

Die höchsten Methan-Flächenerträge im Mai 2007 erzielten die Getreide-Varianten (Abbildung 9). Insbesondere die Roggensorten, die neben hohen Trockenmasseerträgen auch hohe spezifische Methanerträge ($0,307 \text{ Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ TM}$; Winterroggen, Sorte „Vitallo“) aufwiesen, erbrachten hohe Methan-Flächenerträge.

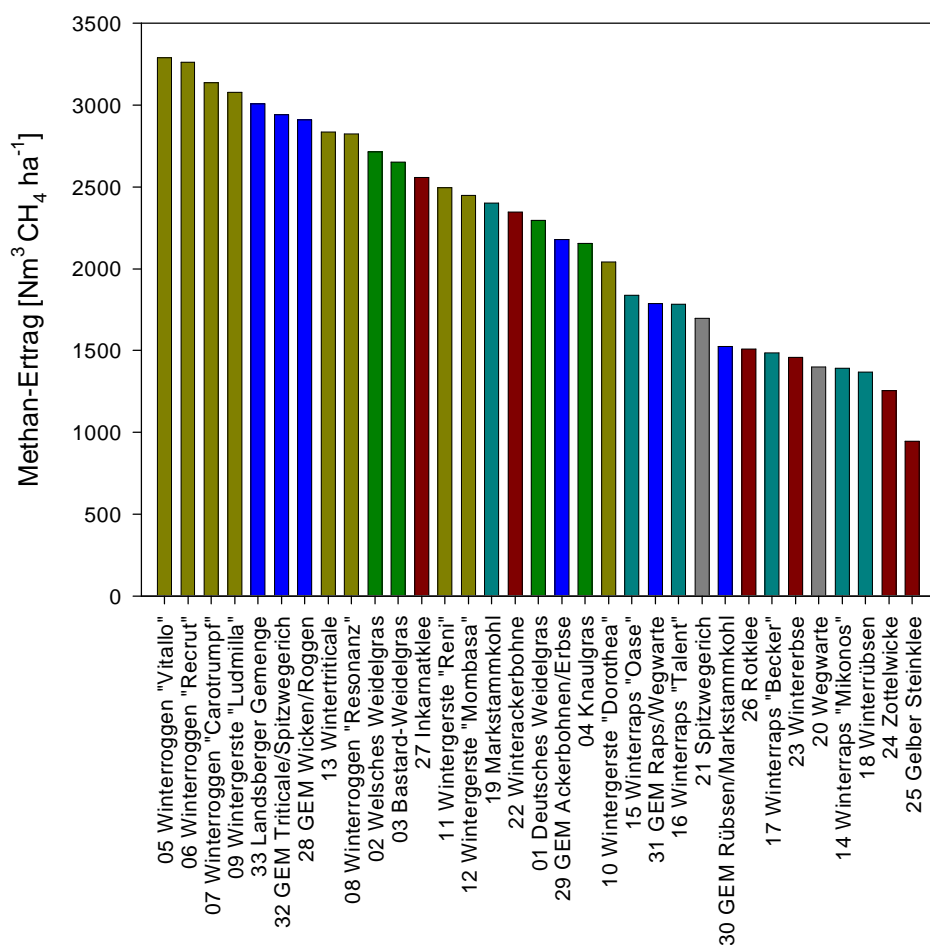


Abbildung 9: Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte im Mai 2007.

Ertragreichste Variante war Winterroggen, Sorte „Vitallo“ ($3290 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). Ebenfalls ertragreich waren das Landsberger Gemenge ($3009 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) sowie das Welsche Weidelgras ($2713 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) und das Bastard-Weidelgras ($2650 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$). Inkarnatklee konnte aufgrund seines geringeren spezifischen Methanertrages ($0,24 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ TM}$) nicht die hohen Methan-Flächenerträge der Roggen-Varianten erbringen. Geringe Methan-Flächenerträge lieferten die Raps-Varianten und die Leguminosen Zottelwicke und Gelber Steinklee.

Zweites Versuchsjahr

Höchste Methan-Flächenerträge wurden bei der Ernte im Mai 2008 vom Landsberger Gemenge erzielt ($2667 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$, Abbildung 10). Des Weiteren lieferten Inkarnatklee, Wickroggen, Welsches Weidelgras und Bastard-Weidelgras im zweiten Versuchsjahr hohe Methan-Flächenerträge. Die Getreide-Varianten konnten aufgrund der geringen TM-Erträge des zweiten Versuchsjahres nur geringe Methan-Flächenerträge erbringen. Geringste Methan-Flächenerträge wurden von Winterackerbohnen ($680 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) und Gelbem Steinklee ($333 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) erzielt.

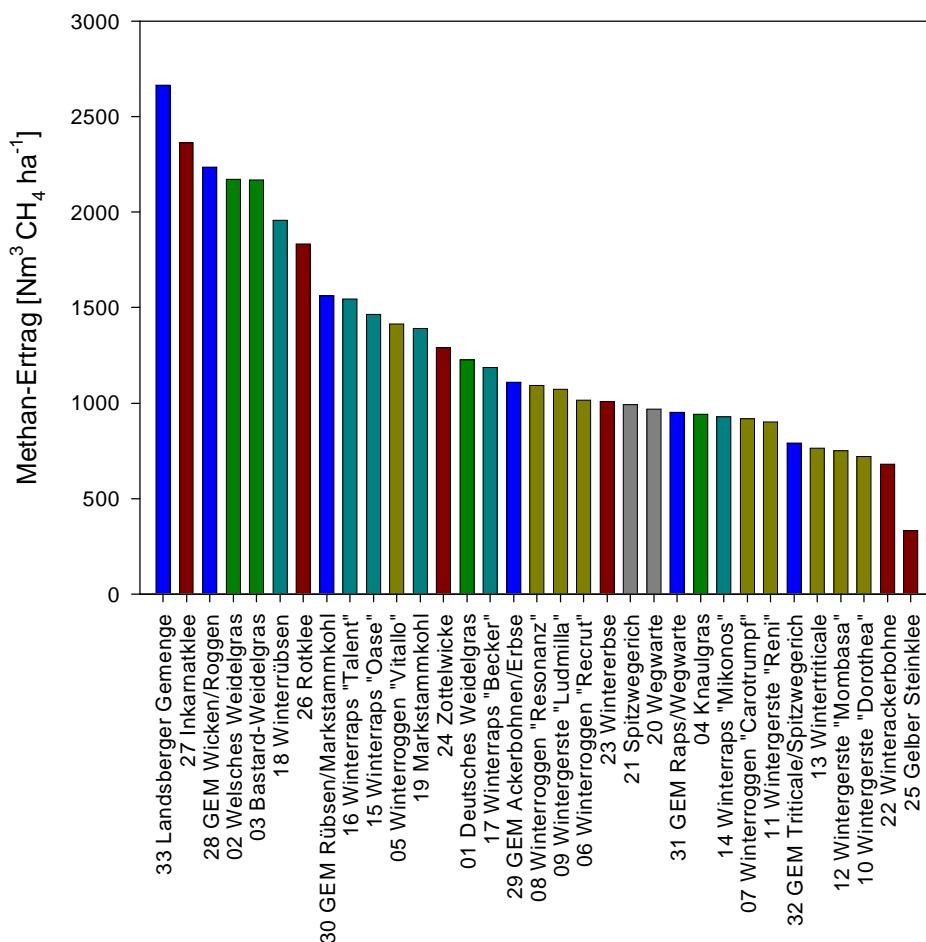


Abbildung 10: Methan-Flächenerträge der Winterzwischenfrüchte im Mai 2008.

3.5 Erntemenge des Energiemaises

Erstes Versuchsjahr

Die höchsten Maiserträge (Mais ungedüngt) wurden erreicht, wenn der Mais der Schwarzbrache folgte (165 dt TM ha⁻¹, Abbildung 11). Hohe Erträge wurden stets erzielt, wenn vor dem Mais eine Leguminose oder ein Leguminosen-Gemenge angebaut wurde. Wurde Mais nach Kreuzblütlern angebaut, war der Ertrag des Maises tendenziell höher als nach dem Anbau der Getreide-Varianten. Die geringsten Maiserträge wurden nach dem Anbau der Futtergräser und Spitzwegerich erzielt.

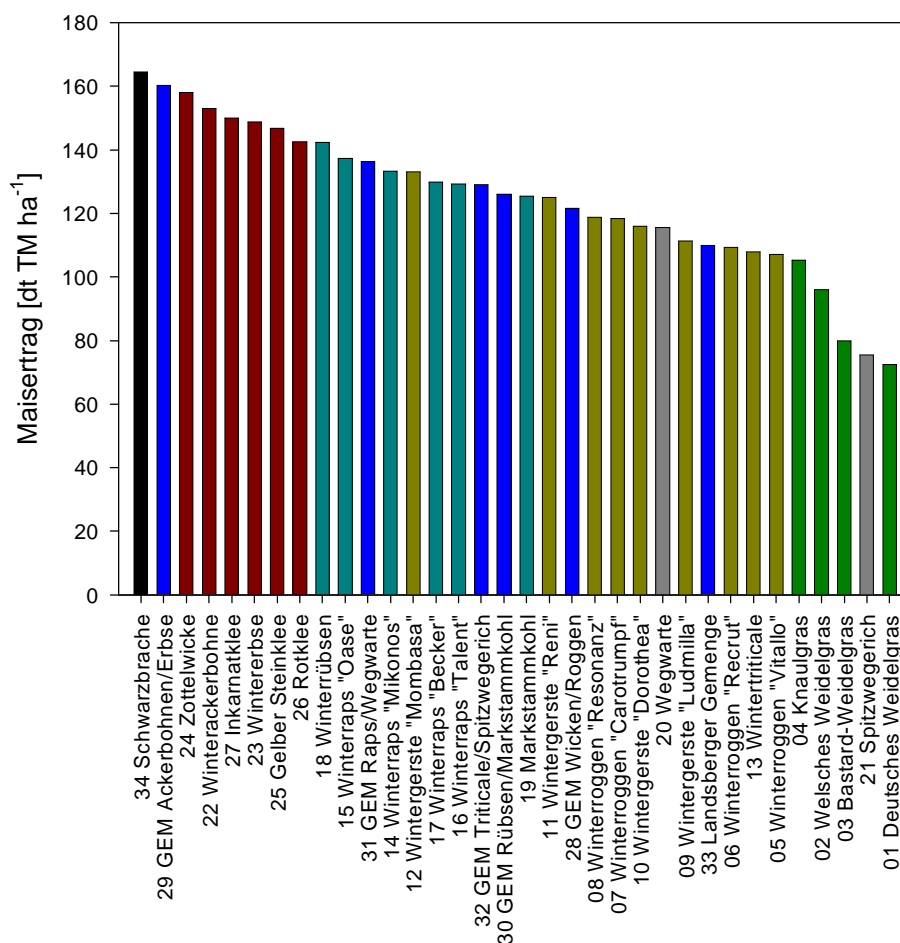


Abbildung 11: Trockenmasse-Erträge des Energiemaises im November 2007 in Abhängigkeit von der vorausgegangenen Winterzwischenfrucht; keine Düngung des Maises.

Zweites Versuchsjahr

Höchste Maiserträge (Mais ungedüngt) wurden im zweiten Versuchsjahr erzielt, wenn der Mais nach Zottelwicken (147 dt TM ha⁻¹) oder Schwarzbrache (136 dt TM ha⁻¹) angebaut wurde (Abbildung 12). Nach einer Leguminose oder einem Gemenge mit Beteiligung einer Leguminose wurden höhere Erträge erzielt als bei dem Anbau von Energiemais nach Nicht-Leguminosen. Der Anbau von Mais nach Kreuzblütlern führte stets

zu höheren Mais-Erträgen als der Anbau nach Wintergetreide. Geringe Erträge erbrachte der Energiemais, wenn die Vorfrüchte Kräuter oder Futtergras-Varianten waren. In beiden Versuchsjahren waren die Maiserträge nach Deutschem Weidelgras am geringsten.

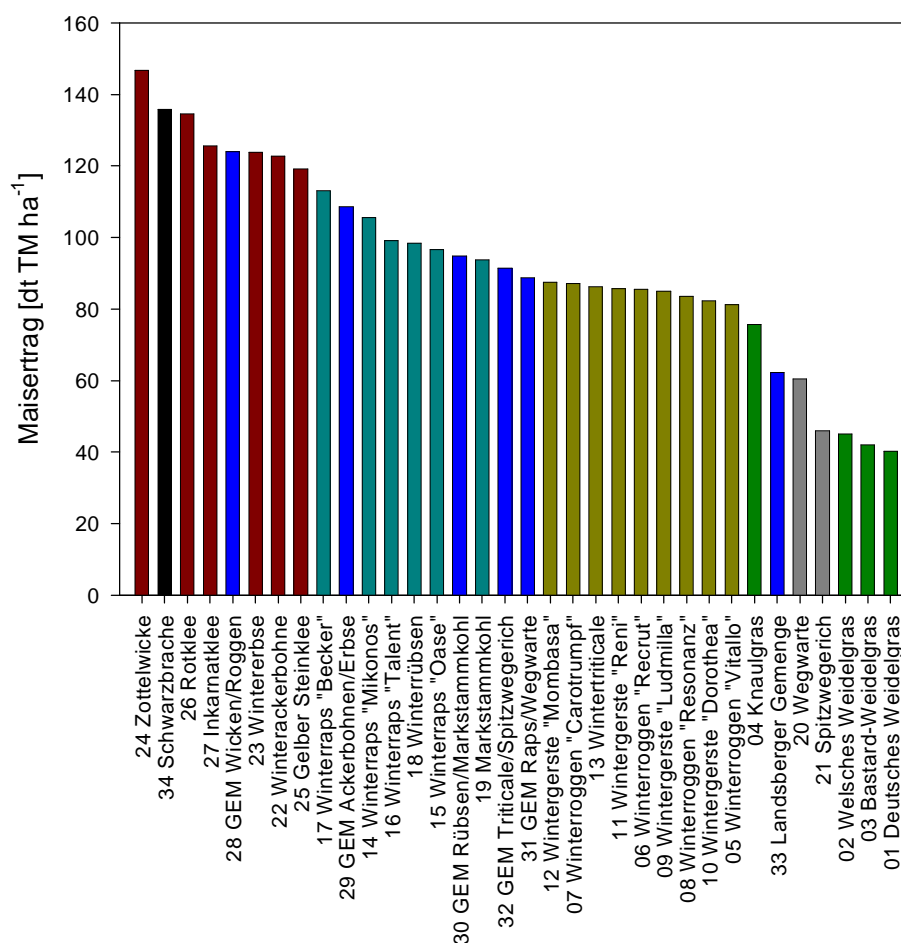


Abbildung 12: Trockenmasse-Erträge des Energiemaisses im November 2008 in Abhängigkeit von der vorausgegangenen Winterzwischenfrucht; keine Düngung des Maisses.

Um die Wirkung einer Düngung mit Gärresten auf den Ertrag von Energiemais zu untersuchen, wurde der Mais der Varianten 35 bis 39 zur Aussaat gedüngt (Tabelle 4).

Tabelle 4: TM-Ertrag des Maisses bei einer Düngung des Energiemaisses mit Gärresten

Erstes Versuchsjahr

Variante	Maisertrag bei Düngung mit Gärresten	Mehrertrag durch Düngung
	[dt TM ha ⁻¹]	[dt TM ha ⁻¹]
35 Deutsches Weidelgras	120,2	47,8
36 Winterroggen „Vitallo“	162,7	55,6
37 Winterraps „Mikonos“	150,0	16,7
38 Wintererbse	173,9	25,1
39 Landsberger Gemenge	135,5	25,7

Zweites Versuchsjahr

Variante	Maisertrag bei Düngung mit Gärresten	Mehrertrag durch Düngung
	[dt TM ha ⁻¹]	[dt TM ha ⁻¹]
35 Deutsches Weidelgras	124,6	84,4
36 Winterroggen „Vitallo“	145,6	64,3
37 Winterraps „Mikonos“	158,7	53,1
38 Wintererbse	149,6	25,9
39 Landsberger Gemenge	138,0	75,7

In allen Fällen konnte bei der Düngung des Energiemaises durch Gärreste eine Ertragssteigerung beobachtet werden. Höchste Ertragssteigerungen wurden im ersten Versuchsjahr bei Mais nach Winterroggen (Sorte „Vitallo“) und nach Deutschem Weidelgras gemessen, während eine Düngung des Maises nach der Vorkultur Winterraps (Sorte „Mikonos“) nur geringe Ertragszuwächse bewirkte. Der höchste Maisertrag bei einer Düngung mit Gärresten wurde nach Wintererbsen erzielt.

Im zweiten Versuchsjahr zeigte der Energiemais nach Deutschem Weidelgras und nach Landsberger Gemenge die größten Ertragssteigerungen; nach Wintererbsen zeigte Mais die geringste Ertragssteigerung durch die Düngung. Der höchste Maisertrag wurde erzielt, wenn der Mais gedüngt und nach der Vorkultur Winterraps (Sorte „Mikonos“) angebaut wurde.

Im Mittel der beiden Versuchsjahre waren die Maiserträge bei Gärrestdüngung nach dem Deutschen Weidelgras mit 122 dt TM ha⁻¹ am geringsten und nach den Wintererbsen am höchsten (162 dt TM ha⁻¹). Gerade umgekehrt waren die düngungsbedingten Zuwächse im Mittel der beiden Versuchsjahre nach dem Deutschen Weidelgras mit 66 dt TM ha⁻¹ am größten und nach den Wintererbsen am kleinsten (26 dt TM ha⁻¹). Dies unterstützt zum einen die These wonach es in den Weidelgrasparzellen, bedingt durch die vielen Wurzelrückstände, zu einer Stickstoffimmobilisierung gekommen ist, die durch die Düngung teilweise wieder aufgehoben werden konnte. Zum anderen dürfte die Düngung nach den Wintererbsen beim Mais zu einem Nährstoff-Luxuskonsum geführt haben.

3.6 Index (I_{RA}) der relativen Anbauwürdigkeit von Winterzwischenfrüchten

Erstes Versuchsjahr

Der Index der relativen Anbauwürdigkeit zeigt für das erste Versuchsjahr ($I_{RA\ 2006/07}$) die höchsten Werte für Landsberger Gemenge (0,83) und Markstammkohl (0,76). Etwa

gleiche Werte erreichten das Gemenge aus Wicken und Roggen (0,69) sowie Inkarnatklée (0,67). Positive Werte wurden des Weiteren bei den Kreuzblütlern, den Gemengen mit Kreuzblütlern und den Futtergräsern ermittelt (Abbildung 13). Hingegen zeigten alle Wintergetreide-Varianten außer Wintergerste (Sorte „Ludmilla“) negative Indizes. Große, negative Index-Werte von -1,3 erzielten Wintererbsen und das Gemenge aus Wintererbsen und Winterackerbohnen (-0,95).

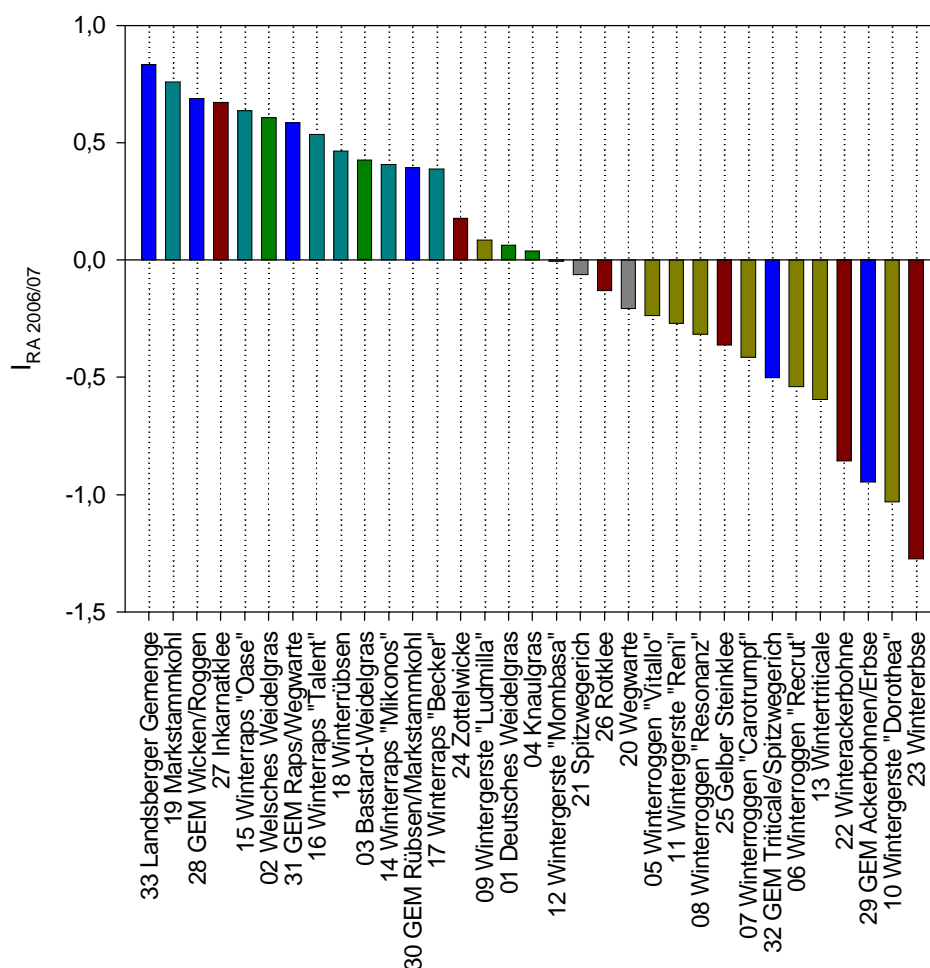


Abbildung 13: Index der relativen Anbauwürdigkeit (I_{RA}) von Winterzwischenfrüchten des Versuchsjahres 2006/07.

Zweites Versuchsjahr

Das Gemenge aus Wicken und Roggen erzielte mit dem Index $I_{RA\ 2007/08} = 1,5$ den höchsten Index-Wert des zweiten Versuchsjahres (Abbildung 14). Ebenfalls günstige Werte erreichten das Landsberger Gemenge (1,4) und Inkarnatklée (1,3). Die Werte der Kreuzblütlern lagen im zweiten Versuchsjahr zwischen 0,29 (Markstammkohl) und 0,88 (Winterraps, Sorte „Talent“). Die Futtergräser Welsches Weidelgras und Bastard-

Weidelgras zeigten positive Index-Werte, während das Deutsche Weidelgras und Knaulgras leicht negative Index-Werte aufwiesen. Ebenfalls negative Index-Werte zeigten sämtliche Getreide-Varianten und die Leguminosen Wintererbsen und Winterackerbohnen sowie das Gemenge aus Triticale und Spitzwegerich.

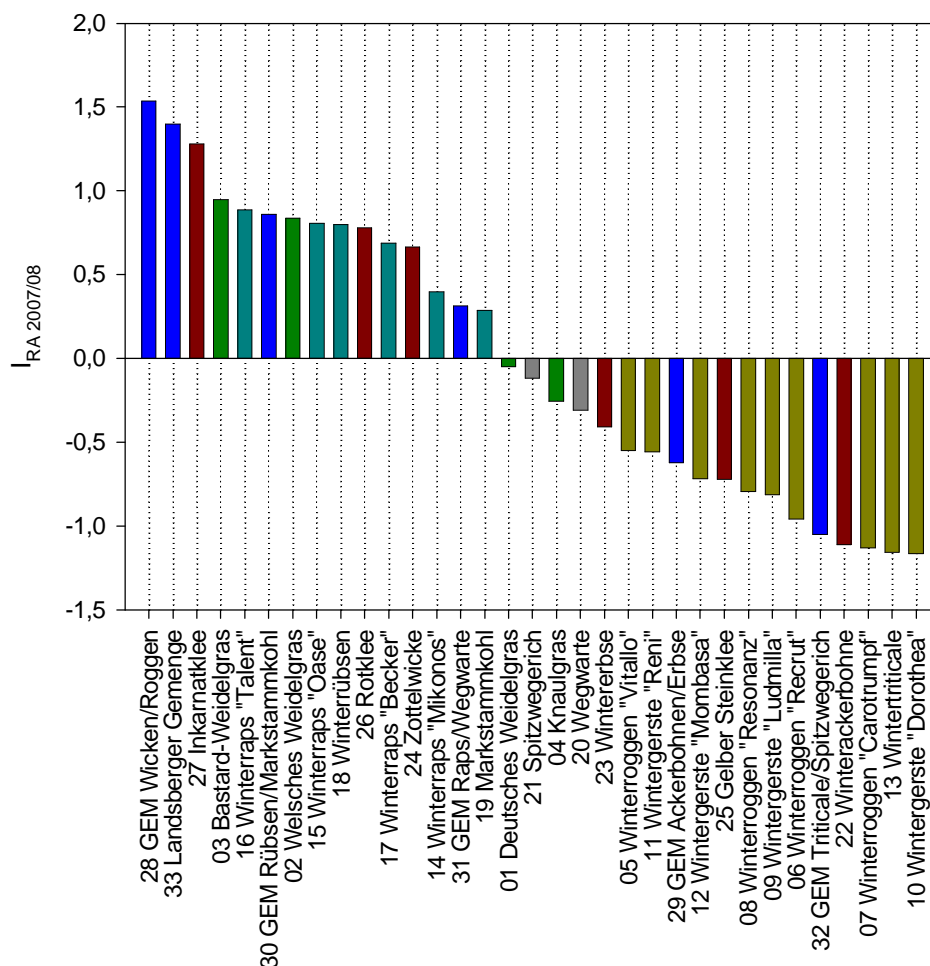


Abbildung 14: Index der relativen Anbauwürdigkeit (I_{RA}) von Winterzwischenfrüchten des Versuchsjahres 2007/08.

In beiden Versuchsjahren konnten Landsberger Gemenge, Inkarnatklee sowie das Gemenge aus Zottelwicke und Winterroggen hohe Indizes erzielen. Die genannten Gemenge erreichten die hohen Werte aufgrund der hohen Werte bei den Nmin-Indizes und den Winterzwischenfrucht-Indizes. Allerdings waren die Energiemais-Indizes bei diesen Varianten leicht negativ. Demgegenüber zeigte Inkarnatklee bei allen drei Teil-Indizes in beiden Versuchsjahren positive Werte.

Negative Indizes wurden bei den Getreide-Varianten ermittelt. Diese Varianten konnten insbesondere im ersten Versuchsjahr sehr hohe Zwischenfrucht-Indizes erzielen, jedoch waren die Nmin-Indizes sowie die Energiemais-Indizes dieser Varianten häufig negativ. Geringe Indizes erzielten des Weiteren die großkörnigen Leguminosen. Diese konnten die negativen Werte ihres Nmin-Indexes und des Zwischenfrucht-Indexes auch durch zum Teil hohe Energiemais-Indizes nicht ausgleichen.

Mittelwerte über beide Versuchsjahre

Die Bildung des arithmetischen Mittelwertes aus den Indizes der relativen Anbauwürdigkeit von Winterzwischenfrüchten aus den Versuchsjahren 2006/07 und 2007/08 ergab gleich hohe Werte für die beiden Gemenge-Varianten Landsberger Gemenge (1,11) und Wickroggen (1,11). Inkarnatklee (0,98) konnte den höchsten mittleren Gesamtindex unter den Reinsaaten erreichen. Positive Werte erzielten die Kreuzblütler sowie die Weidelgras-Varianten Welsches Weidelgras und Bastard-Weidelgras. Hingegen war das Deutsche Weidelgras bei allen drei Teil-Indizes schwächer als die anderen Weidelgras-Varianten und erreichte als mittleren Gesamtindex nur den Wert 0,01. Die Werte der Kräuter sowie aller Getreide-Varianten lagen im negativen Bereich. Schwächste Variante war Wintergerste der Sorte „Dorothea“ (-1,1). Diese Winterbraugerste wies einen sehr geringen Nmin-Index und einen geringen Zwischenfruchtindex auf. Auch die großkörnigen Leguminosen in Reinsaat sowie deren Gemenge erzielten hohe, negative Index-Werte.

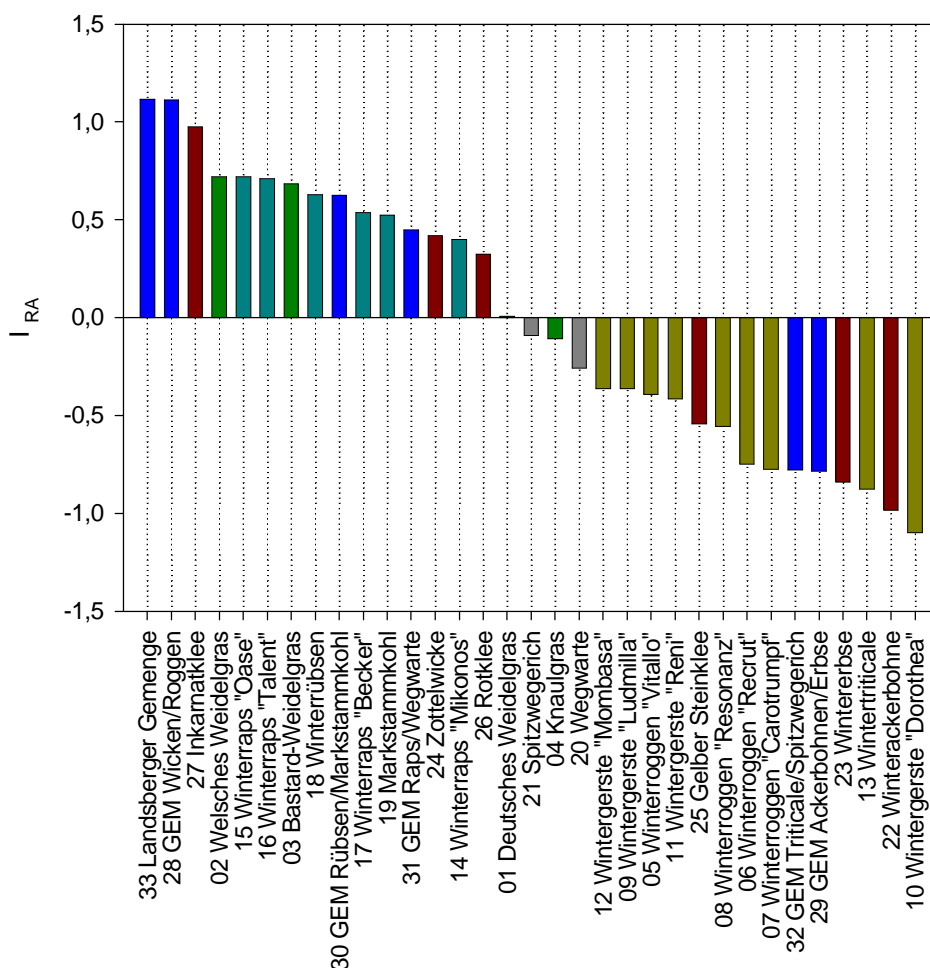


Abbildung 15: Mittlerer Gesamtindex (I_{RA}) der relativen Anbauwürdigkeit von Winterzwischenfrüchten. Mittelwert aus den zwei Versuchsjahren 2006/2007 und 2007/2008.

4 Fazit

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat ergeben, dass die angebauten Winterzwischenfrüchte die an sie gestellten Anforderungen der

- Nmin-Absenkung im Winter
- Lieferung hoher Trockenmasse- und Methanerträge
- günstigen Vorfruchtwirkung auf den nachfolgenden Energiemais

recht unterschiedlich zu erfüllen vermochten. Die Leistungen der verschiedenen Pflanzengruppen als Winterzwischenfrüchte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Futtergräser und Kreuzblütler, aber auch die kleinkörnigen Leguminosen Inkarnatklee und Zottelwicken, waren in der Lage den Nmin-Wert im Winter deutlich abzusenken.
- Die Wintergetreide-Varianten sowie die großkörnigen Leguminosen Winterackerbohnen und Wintererbsen sind zur Absenkung der Nmin-Werte im Winter nicht geeignet.
- Durch die Unterschiede im Wurzelwachstum der Winterzwischenfrüchte ließ sich nur ein kleiner Teil der Variabilität der Nmin-Werte im Winter erklären.
- Die Wintergetreide-Varianten, Landsberger Gemenge und Wickroggen waren in der Lage hohe TM- und Methan-Flächenerträge hervorzubringen.
- Nach Schwarzbrache oder dem Anbau von Leguminosen konnten höchste Maiserträge erzielt werden. Geringe Maiserträge wurden erreicht wenn Mais den Kräutern oder den Weidelgras-Varianten folgte (Mais ungedüngt).
- Das Landsberger Gemenge, der Wickroggen und der Inkarnatklee sind die Winterzwischenfrüchte, die insgesamt am anbauwürdigsten erscheinen.
- Wintererbsen und Winterackerbohnen sowie die meisten der Getreidearten und -sorten einschließlich Triticale erwiesen sich als wenig anbauwürdig.
- Die Gärrestdüngung führte zu einer deutlichen Steigerung der Maiserträge, insbesondere nach Deutschem Weidelgras als vorausgehende Zwischenfrucht.