



Umsatz und Wirkung vegetabiler Düngemittel im ökologischen Gemüseanbau

Erstellt von:

Universität Kassel, Fachgebiet Bodenbiologie und Pflanzenernährung
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Nordbahnhofstr. 1a, 37213 Witzenhausen
Tel.: +49 5542 98-1592, Fax: +49 5542 98-1596
E-Mail: sbeck@wiz.uni-kassel.de
Internet: <http://www.uni-kassel.de/fb11cms/bbp/?c=1>

Gefördert vom Bundesministerium für
Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau

Dieses Dokument ist über <http://forschung.oekolandbau.de> verfügbar.



Dieses Dokument ist in der Wissenschaftsplattform des Zentralen Internetportals "Ökologischer Landbau" archiviert und kann in der Datenbank Organic Eprints unter <http://orgprints.org/view/projects/de-boel-pflanze-pflanzenernaehrung.html> heruntergeladen werden.

Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Forschungsauftrag 02OE169
Umsatz und Wirkung vegetabiler Düngemittel
im ökologischen Gemüseanbau
Juni 2002 – Dezember 2003
Abschlussbericht

Antragssteller

Universität Kassel
Mönchebergstr. 19
34117 Kassel

Ausführende Stelle

Fachgebiet Bodenbiologie und Pflanzenernährung
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Universität Kassel
Nordbahnhofstr. 1a
37213 Witzenhausen

Projektleiter

Dr. sc. agr. Torsten Müller

Fachgebiet Bodenbiologie und Pflanzenernährung
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Universität Kassel
Nordbahnhofstr. 1a
37213 Witzenhausen
Tel.: (05542) 98-1504
Fax: (05542) 98-1596
e-mail: tmuller@wiz.uni-kassel.de

Partner

Prof. Dr. sc. agr. Peter von Fragstein und Niemsdorff

Fachgebiet Ökologischer Land- und Pflanzenbau
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Universität Kassel
Nordbahnhofstr. 1a
37213 Witzenhausen
Tel.: (05542) 98-1567
Fax: (05542) 98-1568
e-mail: pvf@wiz.uni-kassel.de

Inhaltsverzeichnis

1	ZIELE UND AUFGABENSTELLUNG DES PROJEKTS.....	8
1.1	PLANUNG UND ABLAUF DES PROJEKTS	8
1.2	WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	9
2	EXPERIMENTELLER TEIL.....	10
2.1	INKUBATIONSVERSUCHE	10
2.1.1	<i>Material und Methoden.....</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Ergebnisse</i>	<i>11</i>
2.1.3	<i>Diskussion</i>	<i>12</i>
2.2	GEFÄßVERSUCHE.....	21
2.2.1	<i>Material und Methoden.....</i>	<i>21</i>
2.2.1.1	Versuchsanlage und Ernte	21
2.2.1.2	Boden	22
2.2.1.3	Statistik.....	23
2.2.2	<i>Ergebnisse und Diskussion.....</i>	<i>23</i>
2.2.2.1	Pflanzen	23
2.2.2.2	Boden	24
2.3	FELDVERSUCHE.....	36
2.3.1	<i>Material und Methoden.....</i>	<i>36</i>
2.3.1.1	Versuchsanlage und Ernte	36
2.3.1.2	Boden	37
2.3.1.3	Statistik.....	38
2.3.2	<i>Ergebnisse und Diskussion.....</i>	<i>39</i>
2.3.2.1	Witterung.....	39
2.3.2.2	Pflanzen	39
2.3.2.3	Boden	40
2.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DEN ÖKOLOGISCHEN LANDBAU UND VORSCHLÄGE FÜR MAßNAHMEN DURCH DAS BMVEL.....	61
3	ZUSAMMENFASSUNG	63
4	GEGENÜBERSTELLUNG DER URSPRÜNGLICH GEPLANTEN ZU DEN TATSÄCHLICH ERREICHTEN ZIELEN	65
4.1	LAUT ARBEITSPLAN GEPLANTE ARBEITSSCHRITTE (SOLL)	65

4.2	TATSÄCHLICH DURCHGEFÜHRTE ARBEITSSCHRITTE (IST).....	65
4.3	VERGLEICH ZWISCHEN SOLL UND IST.....	67
4.3.1	<i>Verspäteter Projektbeginn</i>	67
4.3.2	<i>Versuche</i>	67
4.3.3	<i>Veröffentlichungen</i>	67
5	LITERATURVERZEICHNIS	68
6	DANKSAGUNG	70

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1: ZEITVERLÄUFE DER KUMULATIVEN CO ₂ -ENTBINDUNG, DES MIKROBIELLEN BIOMASSE C (C _{MIK}), DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN C (TOC _{EXT}) UND DER SUMME AUS DIESEN DREI MESSGRÖßEN (C _{SUM}) IM VERLAUF DER INKUBATIONSEXPERIMENTE. DIE BALKEN ZEIGEN DIE HONESTLY SIGNIFICANT DIFFERENCE (TUKEY, P ≤ 0,05) ZWISCHEN DEN DÜNGERVARIANTEN SOFERN SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE VORLAGEN, BEIM CO ₂ NUR FÜR DEN LETZTEN TERMIN.	18
ABBILDUNG 2-2: ZEITVERLÄUFE DER MINERALISCHEN N (N _{MIN}), DES MIKROBIELLEN BIOMASSE N (N _{MIK}), DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN N (TON _{EXT}) UND DER SUMME AUS DIESEN DREI MESSGRÖßEN (N _{SUM}) IM VERLAUF DER INKUBATIONSEXPERIMENTE.	19
ABBILDUNG 2-3: BRUTTO-MINERALISATION UND BRUTTO-IMMOBILISATION VON N WÄHREND DES ABBAUS VON LEGUMINOSENKÖRNER-SCHROTEN BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN.....	20
ABBILDUNG 2-4: N-EFFIZIENZ VEGETABILER DÜNGER BEI MÖHREN IM GEFÄßVERSUCH	33
ABBILDUNG 2-5: N-EFFIZIENZ VEGETABILER DÜNGER BEI RADIESCHEN IM GEFÄßVERSUCH	33
ABBILDUNG 2-6: ZEITVERLÄUFE DER RATE DER CO ₂ -ENTBINDUNG AUS DEM BODEN, DES MIKROBIELLEN BIOMASSE C (C _{MIK}) UND DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN C (TOC _{EXT}) IM BODEN BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	34
ABBILDUNG 2-7: ZEITVERLÄUFE DER MINERALISCHEN N (N _{MIN}), DES MIKROBIELLEN BIOMASSE N (N _{MIK}) UND DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN N (TON _{EXT}) IM BODEN BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	35
ABBILDUNG 2-8: EINFLUSS VEGETABILER DÜNGER AUF DEN ROHERTRAG VON WEIßKOHL.....	53
ABBILDUNG 2-9: EINFLUSS VEGETABILER DÜNGER AUF DAS EINZELKOPF-GEWICHT VON WEIßKOHL.	53
ABBILDUNG 2-10: EINFLUSS VEGETABILER DÜNGER AUF DEN N-ERTRAG VON WEIßKOHL.....	54
ABBILDUNG 2-11: EINFLUSS VEGETABILER DÜNGEMITTEL AUF DEN NO ₃ -GEHALT VON WEIßKOHL.	54
ABBILDUNG 2-12: N-EFFIZIENZ VEGETABILER DÜNGER BEI KOPFKOHL IM FELDVERSUCH	55
ABBILDUNG 2-13: N-EFFIZIENZ DER VEGETABILEN DÜNGER BEI RADIESCHEN IM FELDVERSUCH...	55
ABBILDUNG 2-14: ZEITVERLÄUFE DER RATE DER CO ₂ -ENTBINDUNG AUS DEM BODEN, DES MIKROBIELLEN BIOMASSE C (C _{MIK}) UND DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN C (TOC _{EXT}) IM BODEN BEI DEN FELDVERSUCHEN.....	56
ABBILDUNG 2-15: ZEITVERLÄUFE DES MINERALISCHEN N (N _{MIN}) IN 0-15 CM UND 15-30 CM, DES MIKROBIELLEN BIOMASSE N (N _{MIK}) UND DES K ₂ SO ₄ -EXTRAHIERBAREN ORGANISCHEN N (TON _{EXT}) IM BODEN BEI DEN FELDVERSUCHEN.	58
ABBILDUNG 2-16: MINERALISCHER N ZU BEGINN (START) UND AM ENDE DER FELDVERSUCHE ...	60

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: C- UND N-GEHALTE SOWIE GEHALTE DER VAN SOEST FRAKTIONEN „CELLULOSE“, „HEMIZELLULOSE“ UND „LIGNIN“ DER IN DEN INKUBATIONSEXPERIMENTEN EINGESetzten DÜNGEMITTEL.....	15
TABELLE 2-2: F-TABELLE (ANOVA MIT REPEATED MEASURES) FÜR DEN FAKTOR ZEIT BEI DEN INKUBATIONSVERSUCHEN.	15
TABELLE 2-3: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN C-POOLS WÄHREND DER 64-TÄGIGEN INKUBATION BEI 5 UND 15°C.....	16
TABELLE 2-4: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN N-POOLS WÄHREND DER 64-TÄGIGEN INKUBATION BEI 5 UND 15°C.....	17
TABELLE 2-5: ZEITPLAN DER GEFÄßVERSUCHE. M = MISCHEN VON DÜNGER UND BODEN	27
TABELLE 2-6: C- UND N-GEHALTE SOWIE GEHALTE DER VAN SOEST FRAKTIONEN CELLULOSE, HEMIZELLULOSE UND LIGNIN DER IN DEN GEFÄßVERSUCHEN EINGESetzten DÜNGEMITTEL. ...	28
TABELLE 2-7: FRISCHMASSE (FM)- UND TROCKENMASSE (TM)-ERTRÄGE [G / 20 PFLANZEN / GEFÄß] NACH ANWENDUNG VERSCHIEDENER VEGETABILER DÜNGER IM GEFÄßVERSUCH MIT MÖHREN. 28	28
TABELLE 2-8: N-ERTRAG [MG N/ 20 PFLANZEN / GEFÄß] NACH ANWENDUNG VERSCHIEDENER VEGETABILER DÜNGER IM GEFÄßVERSUCH MIT MÖHREN.	28
TABELLE 2-9: FRISCHMASSE (FM) –ERTRÄGE (KNOLLE + BLATT) [G / 20 PFLANZEN / GEFÄß] NACH ANWENDUNG VERSCHIEDENER VEGETABILER DÜNGER IM GEFÄßVERSUCH MIT RADIESCHEN.	29
TABELLE 2-10: N-ERTRAG (KNOLLE + BLATT) [MG N / 20 PFLANZEN / GEFÄß] NACH ANWENDUNG VERSCHIEDENER VEGETABILER DÜNGER IM GEFÄßVERSUCH MIT RADIESCHEN....	29
TABELLE 2-11: F-TABELLE (ANOVA MIT REPEATED MEASURES) FÜR DEN FAKTOR ZEIT BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	29
TABELLE 2-12: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN C-POOLS BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	30
TABELLE 2-13: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN N-POOLS BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	31
TABELLE 2-14: ZEITPLAN DER FELDVERSUCHE.	45
TABELLE 2-15: C- UND N-GEHALTE SOWIE GEHALTE DER VAN SOEST FRAKTIONEN CELLULOSE, HEMIZELLULOSE UND LIGNIN DER IN DEN FELDVERSUCHEN EINGESetzten DÜNGEMITTEL.....	46
TABELLE 2-16: MONATLICHE WETTERDATEN FÜR DEN ZEITRAUM DER FELDVERSUCHE (WETTERSTATION ULTRALEICHTFLUGSCHULE CALDEN (LIEDMANN, 2003)) SOWIE MINIMALE UND MAXIMALE BODENTEMPERATUREN IN 3 CM TIEFE WÄHREND DEN MESSUNGEN DER CO ₂ -	

ENTBINDUNG AUS DEM BODEN UND DER ENTNAHME DER BODENPROBEN AM FRÜHEN VORMITTAG (JEWEILS ZWISCHEN 5:00 UHR UND 10:00 UHR).....	46
TABELLE 2-17: AUSWIRKUNG DER APPLIKATION VEGETABILER DÜNGER AUF DEN GESAMT- FRISCHMASSE-ERTRAG VON RADIESCHEN [DT/HA] IM FELDVERSUCH	47
TABELLE 2-18: AUSWIRKUNG DER APPLIKATION VEGETABILER DÜNGER AUF DEN N-ERTRAG VON RADIESCHEN [KG N/HA] IM FELDVERSUCH	47
TABELLE 2-19: AUSWIRKUNG DER APPLIKATION VEGETABILER DÜNGER AUF DEN NITRAT- GEHALT VON RADIESCHEN-KNOLLEN [MG NO ₃ /KG FRISCHMASSE] IM FELDVERSUCH.....	47
TABELLE 2-20: F-TABELLE (ANOVA MIT REPEATED MEASURES) FÜR DEN FAKTOR ZEIT BEI DEN FELDVERSUCHEN.	48
TABELLE 2-21: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN C-POOLS BEI DEN FELDVERSUCHEN.	50
TABELLE 2-22: MITTELWERTE, MAXIMA UND SCHLUSSWERTE DER GEMESSENEN N-POOLS BEI DEN GEFÄßVERSUCHEN.	51

1 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts

1.1 Planung und Ablauf des Projekts

Der Gemüseanbau stellt, verglichen mit anderen Feldfrüchten, besondere Anforderungen an die Nährstoffversorgung. Bedingt durch relativ kurze Vegetationszeiten und den Anbau mehrerer Kulturen pro Anbausaison ist eine schnelle Versorgung mit relativ großen Mengen pflanzenverfügbarer Nährstoffe, insbesondere mit Stickstoff, notwendig. Besondere Bedeutung hat dabei das zeitige Frühjahr mit seinen noch recht niedrigen Bodentemperaturen und der damit nur langsam in Gang kommenden Mineralisation aus dem Bodenvorrat.

Traditionell wurden daher u.a. leicht umsetzbare organische Abfälle tierischer Herkunft wie Horn- und Blutmehl als Dünger eingesetzt. Obwohl dies Dünger seit langem in den Positivlisten als zulässige Düngemittel für den ökologischen Land und Gartenbau aufgeführt waren, war deren Anwendung aufgrund ungeklärter Herkunft stets problematisch.

Diese Problematik hat aufgrund der Geschehnisse der letzten Zeit erheblich an Brisanz gewonnen. Als Folge wurden Düngemittel tierischer Herkunft, vorläufig mit Ausnahme von Hornprodukten, aus den Richtlinien der Anbauverbände gestrichen.

Eine Strategie zum Ausgleich der dadurch entstandenen Nährstoffengpässe ist der Einsatz leicht umsetzbarer organischer Düngemittel pflanzlicher Herkunft (vegetabile Düngemittel). In Frage kommen hier neben verschiedenen bereits kommerziell angebotenen Düngemitteln vor allem Körnerleguminosenschrote.

Gesamtziel des Forschungsvorhabens war es herauszufinden, welchen Beitrag vegetabile Düngemittel für die Stickstoffversorgung von Gemüse liefern. Hierin wird ein wesentlicher Beitrag gesehen, den Widerspruch bisheriger Düngerpraxis im ökologischen Gartenbau (vermehrter Einsatz N-betonter Schlachthausabfälle) zugunsten systemkonformer (im Idealfall eigenproduzierter) vegetabiler Düngemittel aufzulösen.

Dem Projekt lag folgende Hypothese zu Grunde:

„Leguminosenkörnerschrote und andere vegetabile Düngemittel mit hohem Stickstoffgehalt (niedrigen C/N-Verhältnissen) werden, auch unter den Bedingungen des kühlen Frühjahres, im Boden ausreichend schnell umgesetzt. Sie sind daher dazu geeignet einen wesentlichen Beitrag zur Stickstoff-Versorgung von Gemüsekulturen im ökologischen Landbau über das Jahr hinweg zu leisten.“

Im Einzelnen sollten dabei folgende Fragen beantwortet werden:

- Welchen Beitrag liefern vegetabile Düngemittel für die Stickstoff-Versorgung im ökologischen Gemüseanbau?
- Welche Düngemittel sind besonders erfolversprechend?

- Welches sind die zu Grunde liegenden mikrobiellen Prozesse des Umsatzes im Boden und wie können diese gesteuert werden?
- Wie viel des zugeführten Stickstoffs liegt nach Ende der Vegetationsperiode noch mineralisch oder organisch vor und ist somit potentiell auswaschungsgefährdet.

In dem Untersuchungsprogramm sollte durch einen sukzessiven Übergang von Laborversuchen, über Gefäßversuche bis hin zu Feldversuchen die praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse sicher gestellt werden.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Mit dem Ausscheiden von Düngemittel tierischer Herkunft wurde die Relevanz vegetabiler Düngemitteln erst vor kurzer Zeit deutlich erhöht. Untersuchungen zum Einsatz vegetabiler Düngemittel, welche wissenschaftlichen Ansprüchen genügen, liegen daher kaum vor. Dies betrifft insbesondere das Umsatzgeschehen im Boden nach Einarbeitung vegetabiler Düngemittel. Erste vielversprechende eigene Untersuchungen existieren bereits.

Am Fachgebiet Ökologische Land- und Pflanzenbausysteme wurden verschiedene Untersuchungen zum Einsatz von Körnerleguminosenschroten durchgeführt (Braun et al. 2001, Kalauch et al. 2001). Aufbereitete Samen von Lupinen und Ackerbohnen eignen sich vor allem als Düngersubstitute für organische Handelsdünger. Dies geht aus 7-wöchigen Inkubationsversuchen sowie einem Feldversuch mit Spinat hervor.

Eigene Untersuchungen zum Umsatz verschiedenster pflanzlicher Residuen im Boden lagen bei Projektbeginn ebenfalls vor (Jensen et al. 1996, 1997; Magid et al., 2001 ; Mueller et al., 1997, 1998a+b, 2002). Zwei Erkenntnisse sind daraus besonders hervorzuheben:

Entgegen bisheriger Annahmen findet eine Mineralisation von Stickstoff aus leicht umsetzbaren pflanzlichen Rückständen mit niedrigem C/N-Verhältnis (z.B. frische Leguminosengrünmasse) auch bei niedrigen Temperaturen unter 5 °C statt. Dabei kommt es zu einer Entkopplung der C- und N-Mineralisation. Während die Mineralisation des Kohlenstoffs nur langsam voran schreitet, werden erhebliche Anteile des Stickstoffs bereits in mineralischer Form freigesetzt.

Beim Umsatz von pflanzlichen Rückständen im Boden kommt es allenfalls über einen kurzen Zeitraum hinweg zu einem Anstieg der mikrobiellen Biomasse im Boden. Der nicht mineralisierte Teil der Nährstoffe aus dem Pflanzenmaterial passiert die mikrobielle Biomasse offenbar sehr schnell und wird in mikrobielle Residualprodukte (mikrobielle Nekromasse und Exsudate) überführt. Die mikrobiellen Residualprodukte werden durch einen bisher unbekanntem Mechanismus vorübergehend vor einem weiteren mikrobiellen Umsatz geschützt. Sie stehen daher als Quelle für eine spätere Mineralisation zur Verfügung. Geschieht diese Mineralisation zu Zeiten geringer

Aufnahme von Nährstoffen durch die Pflanzen, z.B. Im Herbst, so besteht die Gefahr der Auswaschung, insbesondere des Stickstoffs, ins Grundwasser.

2 Experimenteller Teil

2.1 Inkubationsversuche

2.1.1 Material und Methoden

Bei den Inkubationsversuchen wurde Boden des Ap-Horizonts einer Parabraunerde der Hessische Staatsdomäne Frankenhausen, Schlag „Gartenbreite“ verwendet (Ut3, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 7,1, 1,1 % C, 0,13 % N, 14 mg P_2O_5 100 g^{-1} , 10 mg K_2O 100 g^{-1} , 9 mg MgO 100 g^{-1} ; eigene Messungen und Beprobungspunkt 228 in Brandt *et al.*, 2002). Nach dem Sieben und Präinkubieren des Bodens wurde der Wassergehalt für den eigentlichen Inkubationsversuch auf 50 % WHK_{max} eingestellt. Verschiedene Dünger wurden dann mit einer Menge entsprechend 267 mg N_t kg^{-1} Boden (\approx 200 $\text{kg N}_t \text{ ha}^{-1} 5 \text{ cm}^{-1}$) mit dem Boden vermischt. Die Düngemittel mit ihren gemessenen Eigenschaften gehen aus Tabelle 2-1 hervor. Hornmehl und Rizinusschrot (*Ricinus communis* L.) lagen gebrauchsfertig als Handelsware vor, gleiches galt für die Granulate Phytoperls[®] und Bio-Vegetal[®] (Lieferant Beckmann & Brehm, Beckeln). Laut Hersteller enthält Hornmehl 14 % N und Rizinusschrot 5 % N, 2 % P_2O_5 und 1 % K_2O . Laut Herstellerangaben besteht Phytoperls aus fermentierten Rückständen der Maisverarbeitung mit folgenden Nährstoffgehalten: 7,5% N, 5,5% P_2O_2 , 1% K_2O , CaO & natürlich gebundene Spurennährstoffen. Die Ausgangsbestandteile von Bio-Vegetal sind laut Hersteller pflanzliche Organstoffe, weicherdiges Rohphosphat, Naturkali, Humus, Spezialtonerde und Kieselgur mit folgenden Nährstoffgehalten: 7 % N, 4% P_2O_2 , 7% K_2O . Verglichen mit den eigenen Messungen (Tabelle 2-1) waren also die N-Gehalte der Düngemittel mindestens so hoch wie vom Hersteller angegeben.

Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) sowie Weiße und Gelbe Lupinen (*Lupinus albus* L. und *Lupinus luteus* L.) wurden mit einer Schrotmühle (1 mm Siebeinsatz) beim örtlichen Landhandel geschrotet.

Die so vorbereiteten Böden wurden dann bei 5°C bzw. 15°C für 64 Tage mit vier Parallelen in Einmachgläsern inkubiert. Die Aufstellung in den benutzten Klimaschränken erfolgte in einer randomisierten Blockanlage, wobei jeder der jeweil vier Einlegeböden einem Block entsprach. Für jede Temperatur wurden Nullvarianten (Boden ohne Dünger) und Blindwerte (Geglühter Quarzsand entsprechend dem Volumen des feuchten Bodens) mitgeführt. In jedem Einmachglas befand sich zusätzlich ein Becherglas mit demineralisiertem Wasser und ein Becherglas mit NaOH-Lösung. Zu je 20 Terminen wurden die Gläser geöffnet und belüftet. In der dabei entnommenen NaOH-Lösung wurde das sorbierte CO_2 durch Titration der Restalkalität gemessen und

damit die CO₂-Entbindung aus dem Boden ermittelt (Isermeyer, 1952). An fünf Terminen wurden zusätzlich Bodenproben entnommen. An diesen Proben erfolgte die Messung der mikrobielle Biomasse (C_{mik} und N_{mik}) mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE; Brookes *et al.* 1985; Joergensen, 1996; Joergensen und Mueller, 1994; Vance *et al.* 1987). Im 0,5 M K₂SO₄-Extrakt wurden dabei gleichzeitig löslicher organischer C und N, sowie mineralischen N gemessen.

Eine Umrechnung der C- und N-Fractionen in % Dünger-C bzw. -N erfolgte nach Abzug der in der unbehandelten Versuchsvariante gemessenen C- und N-Mengen:

$$\% \text{ Dünger-C} = (\text{C}_{\text{behandelt}} - \text{C}_{\text{unbehandelt}}) / \text{C}_{\text{Dünger}} \times 100$$

$$\% \text{ Dünger-N} = (\text{N}_{\text{behandelt}} - \text{N}_{\text{unbehandelt}}) / \text{N}_{\text{Dünger}} \times 100$$

Es sei hier darauf hingewiesen, dass es sich dabei nur um rein rechnerische Mengen handelt. Die wirklichen Anteile des Dünger-C bzw. -N in den einzelnen Fraktionen können nur durch Isotopenmarkierung der Düngemittel ermittelt werden, was in dieser Untersuchung nicht der Fall war. Zur statistischen Auswertung wurde eine Varianzanalyse (ANOVA mit repeated measures) mit anschließendem Tukey-Test (Honestly Significant Difference, HSD) durchgeführt.

2.1.2 Ergebnisse

Bei allen gemessenen Variablen traten höchst signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen auf (Tabelle 2-2).

Die verwendeten Düngemittel zeigten deutliche Unterschiede in der C-Mineralisation gemessen an der CO₂-Entbindung aus dem Boden (Abbildung 2-1). Bio-Vegetal nahm dabei eine Sonderrolle ein. Die sehr geringe Menge an C, die mit diesem Düngemittel zugeführt worden war, war extrem leicht mineralisierbar, besonders bei 15°C. Davon abgesehen, mineralisierten die Leguminosenkörnerschrote am meisten C, sowohl absolut (Abbildung 2-1) als auch relativ (Tabelle 2-3) zur zugeführten C-Menge. Bei allen Düngemitteln reagierte die CO₂-Entbindung aus dem Boden positiv auf den Temperatureinfluss.

Bio-Vegetal hat ein extrem niedriges C/N-Verhältnis (Tabelle 2-1). Selbst bei niedrigen Temperaturen mineralisierten über 75% des N aus Biovegetal innerhalb weniger Tage (Tabelle 2-4 und Abbildung 2-2).

Bei 15°C erreichte keines der anderen vegetabilen Düngemittel die Netto-N-Mineralisationsleistung von Hornmehl (Abbildung 2-2). Die Differenz zwischen Hornmehl und Rizinusschrot war jedoch nicht signifikant. Danach folgten Gelbe Lupine, Weiße Lupine, Phytoperls und Ackerbohne. Die Mineralisation von N aus Rizinusschrot kam bei 15°C jedoch zunächst langsamer in Gang als bei den meisten anderen Düngemitteln. Hornmehl, Rizinusschrot und Phytoperls mineralisierten bei 5°C netto weniger N als bei 15°C. Bei den Leguminosenkör-

nerschroten wurde dagegen bei 5°C netto mehr N mineralisiert als bei 15°C. Als Folge waren die Netto-N-Mineralisationen von Gelber Lupine und Hornmehl bei 5°C etwa gleich hoch. Bei dieser Temperatur lagen beide Dünger mit ihrer N-Mineralisationsleistung über dem Rizinusschrot. Für Ackerbohenschrot war im weiteren Verlauf der Inkubation bei 5°C eine Immobilisation von zuvor mineralisiertem N zu erkennen.

Es fällt auf, dass die Leguminosenkörnerschrote, insbesondere Gelbe Lupine, deren N-Mineralisation weniger temperaturabhängig war, deutlich niedrigere Gehalte an schwer abbaubaren Stoffgruppen (Lignin-Fraktion der van Soest Analyse in Tabelle 2-1), dafür aber höhere Gehalte an Zellulose enthielten als die anderen Düngemittel. Reine Zellulose enthält keinen N.

Bei beiden Temperaturen wurde in den Varianten mit Leguminosenkörnerschroten vorübergehend signifikant mehr C und N in die mikrobielle Biomasse eingelagert als bei den anderen Varianten (Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Auch hinsichtlich der Inkubationstemperaturen ergaben sich deutliche Unterschiede. Bei 5°C wurde in allen Varianten vorübergehend mehr C und N in die mikrobielle Biomasse eingelagert als bei 15°C (Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Dies gilt insbesondere für die Leguminosenkörnerschrote. Der dann bei 5°C folgende Rückgang des mikrobiellen Biomasse-N war mengenmäßig geringer als die zeitgleiche N-Mineralisation (vergl. in Abbildung 2-2). Dies führte dazu, dass die Summe der gemessenen N-Pools (N_{sum} in Abbildung 2-2) bei 5°C mit der Zeit deutlich abnahm während die Summe der gemessenen C-Pools (C_{sum} in Abbildung 2-1) ab dem 20. Tag etwa konstant blieb.

K_2SO_4 -löslicher C und N, welcher vermutlich aus den zugeführten Düngemitteln stammt, wurde bei 5°C langsamer umgesetzt als bei 15°C (Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Bei 15°C wurden im weiteren Verlauf der Inkubation erhebliche Mengen an K_2SO_4 -löslichem N gebildet.

Bei niedrigen Temperaturen (5°C) führt der Einsatz von Körnerleguminosen netto zu einem erheblichen N-Priming-Effekt (Tabelle 2-4). In der Variante mit Gelber Lupine konnte rechnerisch bis zu 139 % Dünger-N in den gemessenen Pools gefunden werden. Bis zu 95 % Dünger-N befanden sich vorübergehend allein in der mikrobiellen Biomasse. Für C konnte kein Priming-Effekt nachgewiesen werden. Maximal 67 % des zugegebenen Dünger-C konnte rechnerisch in den gemessenen Pools nachgewiesen werden (Tabelle 2-3).

2.1.3 Diskussion

Die außerordentlich schnelle N-Mineralisation aus dem Düngemittel Bio-Vegetal, zusammen mit dessen extrem niedrigen C/N-Verhältnis (Tabelle 2-1) führt zu der Schlussfolgerung, dass der N in diesem Düngemittel in niedermolekularer, sehr leicht mineralisierbarer Form vorliegen muss. Analysen am Lehrstuhl für Pflanzenernährung der TU München ergaben, dass der N in Bio-

Vegetal zu über 95 % als Harnstoff vorliegt (Hauke Heuwinkel, persönliche Mitteilung¹). Eine Eignung dieses Düngemittels für den Ökologischen Landbau muss daher in Frage gestellt werden.

Die weiteren Beobachtungen lassen sich wie folgt interpretieren. Die Brutto-Mineralisation von N aus organischen Stoffgruppen mit sehr niedrigem C/N-Verhältnis wird auch bei niedrigen Temperaturen kaum verlangsamt. Dagegen werden schwerer abbaubare Stoffgruppen (Lignin-Fraktion der van Soest Analyse in Tabelle 2-1) und Stoffgruppen mit sehr hohem oder unendlichem C/N-Verhältnis (Hemizellulose- und Zellulose-Fractionen der van Soest Analyse in Tabelle 2-1) bei niedrigen Temperaturen deutlich langsamer umgesetzt. Bei Substanzen mit hohen Gehalten in der van-Soest-Ligninfraktion (z.B. Hornmehl, Rizinusschrot) wird der Umsatz bei niedrigen Temperaturen insgesamt verlangsamt. Bei Substanzen mit hohen Zellulose- und Hemizellulosegehalten aber niedrigen Ligningehalten (Leguminosenkörnerschrote) kommt es bei niedrigen Temperaturen lediglich zu einer Verlangsamung des Zellulose- und Hemizelluloseumsatzes und damit zu einer Verminderung der Brutto-N-Immobilisation. Es ergibt sich bei niedrigen Temperaturen dadurch zunächst ein Zeitfenster, in dem N mineralisiert wird, ohne sofort wieder immobilisiert zu werden (Abbildung 2-3). Im Saldo kommt es zu einer erhöhten Netto-Mineralisation von N. Bei höheren Temperaturen laufen diese Umsatzprozesse parallel ab, so dass brutto mineralisierter N zum Teil sofort wieder immobilisiert wird, was zu einer geringeren Netto-Mineralisation von N führt. Bei niedrigen Temperaturen wird ferner der Umsatz der mikrobiellen Biomasse verlangsamt, was zu einer verlängerten Anreicherung von C und N in dieser Fraktion führt. Ein erheblicher Teil des mikrobiellen Biomasse N wird nicht mineralisiert sondern später in mikrobielle Residualprodukte überführt. Bei 5°C wurden unlösliche mikrobielle Residualprodukte angereichert, was sich in einem Abfall der Summen der gemessenen Fraktionen (N_{sum} in Abbildung 2-2 und in geringem Umfang auch C_{sum} in Abbildung 2-1) zeigte. Bei höheren Temperaturen werden die Residualprodukte bereits wieder umgesetzt was in dem Anstieg des K_2SO_4 -extrahierbaren organischen N bei 15°C zum Ausdruck kommt.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Leguminosenkörnerschrote mit engem C/N-Verhältnis als Düngemittel besonders im zeitigen Frühjahr bei niedrigen Temperaturen in Frage kommen. Bei mittleren und hohen Temperaturen war das Rizinusschrot im Inkubationsversuch hinsichtlich der N-Mineralisation allen anderen vegetabilen Düngern überlegen.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen muss einschränkend bemerkt werden, dass die Denitrifikation als mögliche N-Senke nicht berücksichtigt wurde. Nennenswerte Denitrifikation ist

¹ Bio-Vegetal wurde im Rahmen eines anderen Projekts zum Thema Vegetabile Düngemittel von Hauke Heuwinkel (Lehrstuhl für Pflanzenernährung, TU München Weihenstephan) auf den Gehalt an Harnstoff-N untersucht.

allerdings unwahrscheinlich. Zum einen wurde durch regelmäßige Belüftung für aerobe Verhältnisse gesorgt. Zum anderen hätte nennenswerte Denitrifikation zum Verlust des gesamten mineralischen N führen müssen, welcher am Ende bei beiden Temperaturen praktisch vollständig als Nitrat vorlag. Derartige Verluste konnten jedoch nicht registriert werden (Abbildung 2-2).

Tabelle 2-1: C- und N-Gehalte sowie Gehalte der van Soest Fraktionen „Cellulose“, „Hemizellulose“ und „Lignin“ der in den Inkubationsexperimenten eingesetzten Düngemittel.

Die Fraktionen „Cellulose“, „Hemizellulose“ und „Lignin“ charakterisieren vor allem die unterschiedliche Löslichkeit in Säuren. Sie stellen, insbesondere beim Hornmehl, nicht unbedingt einheitliche chemische Stoffgruppen dar. TM = Trockenmasse.

Dünger	C _t [% TM]	N _t [%TM]	C _t /N _t	van Soest Analyse*		
				„Lignin“ [%TM]	„Hemizellulose“ [%TM]	„Zellulose“ [%TM]
Ackerbohne (Körnerschrot)	43,0	4,5	9,7	1,7	18,2	11,3
Weißer Lupine (Körnerschrot)	45,1	5,1	8,9	2,0	7,4	21,0
Gelber Lupine (Körnerschrot)	44,7	6,6	6,8	1,6	3,9	16,2
Phytoperls [®] (Granulat)	41,3	8,0	5,2	31,1	20,7	1,2
Bio-Vegetal [®] (Granulat)	7,6	7,0	1,1	4,0	2,9	0,9
Rizinusschrot	48,2	5,7	8,5	31,3	9,7	9,1
Hornmehl	49,7	15,3	3,3	37,5	11,0	2,2

*Daten z.T. vom Gefäßversuch (s.u.) übernommen

Tabelle 2-2: F-Tabelle (ANOVA mit repeated measures) für den Faktor Zeit bei den Inkubationsversuchen.

*** = Signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen (p<0.001).

Messgröße	5° C	15° C
kumulative CO ₂ -Entbindung	6065***	26717***
mineralischer N	337***	358***
mikrobieller Biomasse-C	228***	126***
mikrobieller Biomasse-N	253***	79***
K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer C	229***	317***
K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer N	46***	367***
Summe C	655***	460***
Summe N	378***	339***

Tabelle 2-3: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen C-Pools während der 64-tägigen Inkubation bei 5 und 15°C.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-C.

	kummulative CO ₂ -Entbindung		mikrobieller Biomasse-C		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer C			Summe C	
	Versuchs-		Versuchs-		Versuchs-		Versuchs-		
	ende	Mittelwerte	ende	Maximum	ende	Maximum	ende	Maximum	
	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	[% Dünger-C]	
5° C									
Rizinusschrot	19	9	15	6	1	2	0,8	27	26
Ackerbohne	36	22	39	15	2	3	0,8	57	52
Weißer Lupine	41	23	38	13	4	9	0,9	65	54
Gelber Lupine	42	25	47	13	4	9	1,6	64	57
Phytoperls	21	10	17	7	5	9	2,9	33	31
Bio-Vegetal	37	-12	15	-23	14	35	11,0	36	25
Hornmehl	29	11	22	10	4	7	2,7	42	41
15° C									
Rizinusschrot	24	8	14	4	1	2	0,5	28	28
Ackerbohne	50	18	34	7	1	2	0,3	58	58
Weißer Lupine	54	18	36	6	2	5	0,4	67	61
Gelber Lupine	51	18	34	8	2	6	0,1	59	59
Phytoperls	30	11	19	7	3	6	0,9	39	38
Bio-Vegetal	18	-13	0	-7	10	38	0,0	32	11
Hornmehl	40	10	23	2	2	5	0,5	44	42

Tabelle 2-4: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen N-Pools während der 64-tägigen Inkubation bei 5 und 15°C.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-N.

	mineralischer N		mikrobieller Biomasse-N		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer N			Summe N	
	Versuchs-			Versuchs-			Versuchs		Versuchs-
	ende	Mittelwerte	Maximum	ende	Mittelwerte	Maximum	ende	Maximum	ende
	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]
5° C									
Rizinusschrot	34	18	41	-4	6	10	8	73	38
Ackerbohne	10	44	94	20	5	11	1	116	31
Weiße Lupine	24	44	90	8	7	14	2	111	35
Gelbe Lupine	37	44	95	-2	8	14	6	139	41
Phytoperls	25	14	26	-3	8	12	4	54	26
Bio-Vegetal	76	5	25	0	37	88	-1	117	75
Hornmehl	41	10	26	-4	6	11	7	60	43
15° C									
Rizinusschrot	48	4	21	-4	11	27	27	72	72
Ackerbohne	7	29	46	13	4	10	10	55	30
Weiße Lupine	36	20	38	-4	8	23	23	58	57
Gelbe Lupine	38	16	42	0	9	20	20	59	59
Phytoperls	29	8	17	3	8	14	14	46	45
Bio-Vegetal	78	-2	14	2	32	82	47	127	127
Hornmehl	53	2	8	-2	12	28	28	78	78

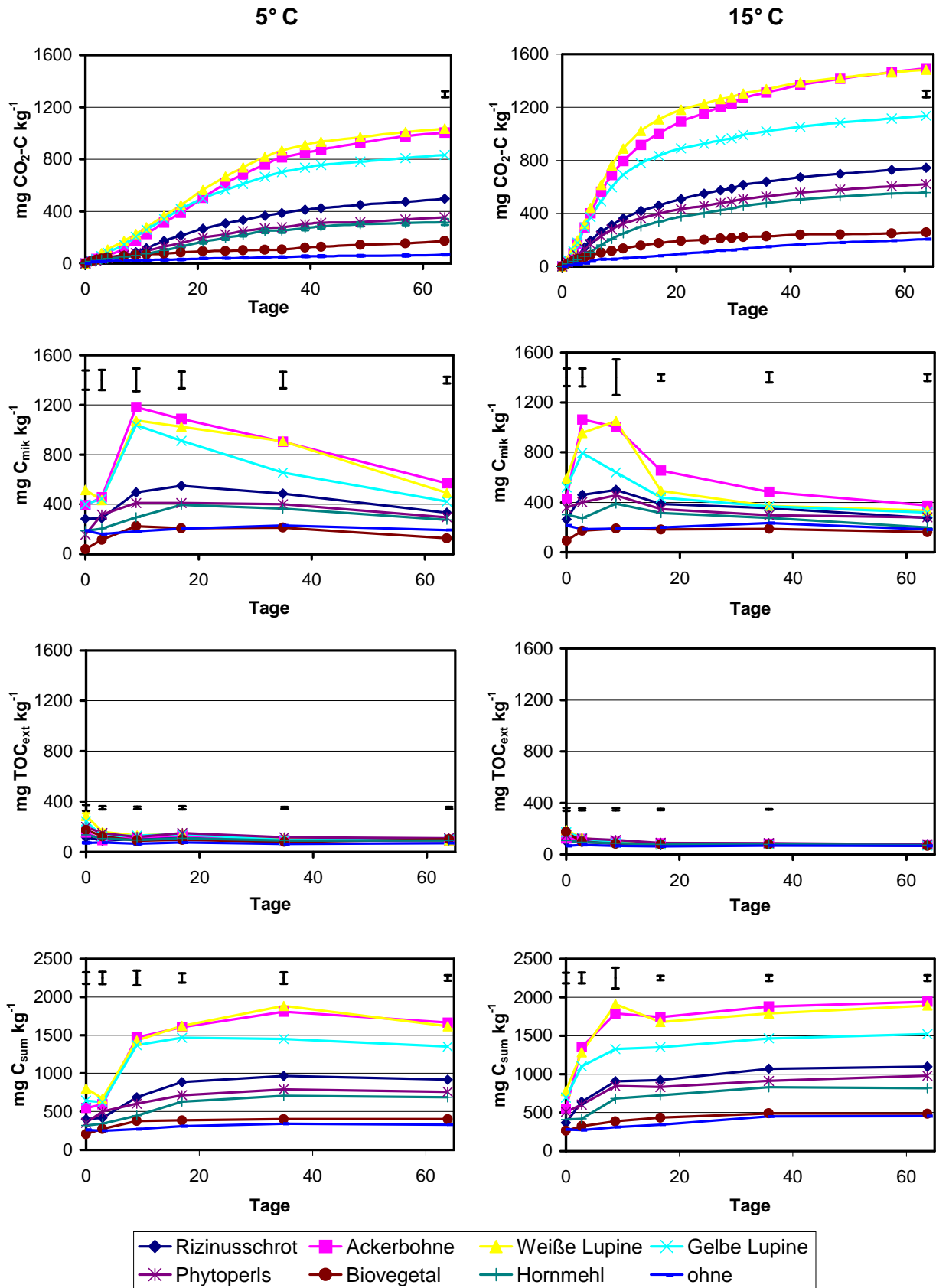


Abbildung 2-1: Zeitverläufe der kumulativen CO₂-Entbindung, des mikrobiellen Biomasse C (C_{mik}), des K₂SO₄-extrahierbaren organischen C (TOC_{ext}) und der Summe aus diesen drei Messgrößen (C_{sum}) während den Inkubationen.

Die Balken zeigen die Honestly Significant Difference (Tukey, P ≤ 0,05) zwischen den Düngervarianten sofern signifikante Unterschiede vorlagen, beim CO₂ nur für den letzten Termin.

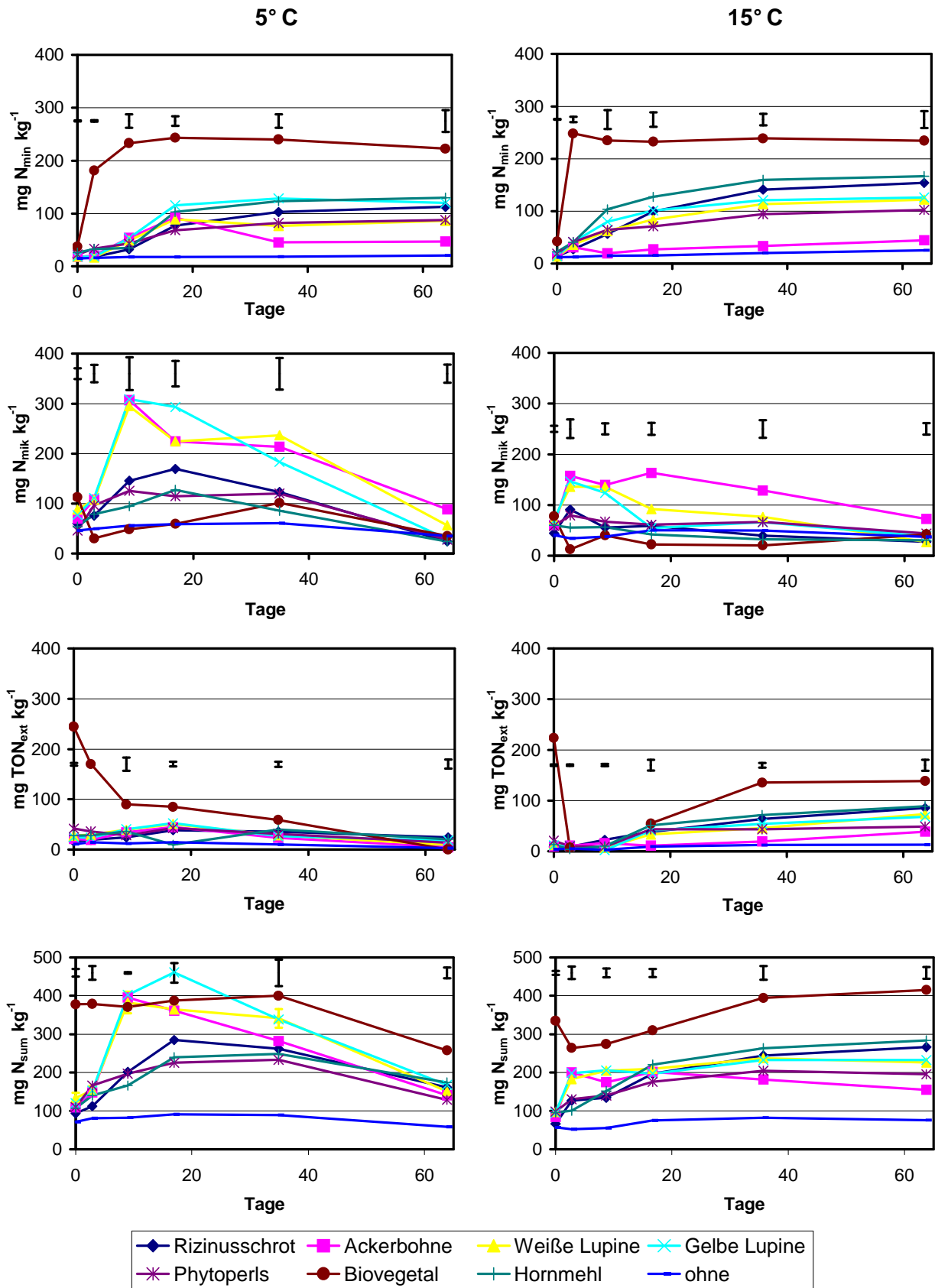
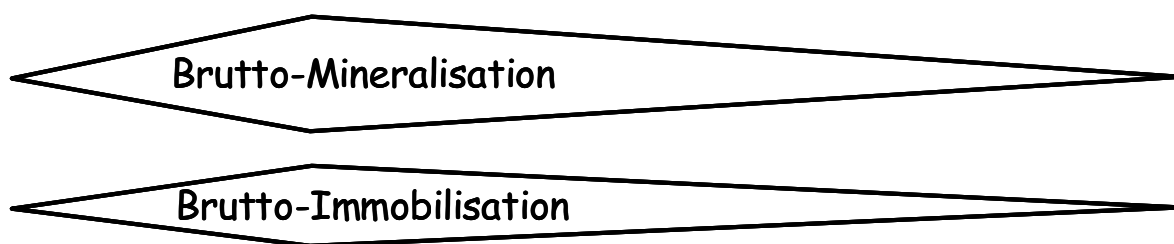


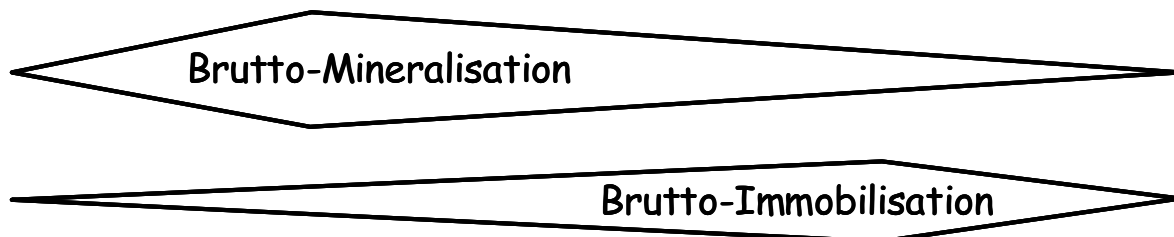
Abbildung 2-2: Zeitverläufe des mineralischen N (N_{min}), des mikrobiellen Biomasse N (N_{mik}), des K_2SO_4 -extrahierbaren organischen N (TON_{ext}) und der Summe aus diesen drei Messgrößen (N_{sum}) während den Inkubationen.

Die Balken zeigen die Honestly Significant Difference (Tukey, $P \leq 0,05$) zwischen den Düngervarianten sofern signifikante Unterschiede vorlagen.

Hohe und mittlere Temperatur



Niedrige Temperatur



Zeit →

Abbildung 2-3: Brutto-Mineralisation und Brutto-Immobilisation von N während des Abbaus von Leguminosenkörnerschroten bei verschiedenen Temperaturen.

2.2 Gefäßversuche

2.2.1 Material und Methoden

2.2.1.1 Versuchsanlage und Ernte

Ursprünglich waren drei Gefäßversuche mit zwei unterschiedlichen Kulturen und einer Brachevariante geplant. Wegen starkem Befall mit der Umfallkrankheit war es jedoch erforderlich, den Versuch mit Radieschen zu wiederholen. Die Brachevariante lief parallel mit dem ersten Radieschenversuch.

Möhren (*Daucus carota* L. ssp. *sativus*)

Der Möhren-Versuch wurde mit Gefäßen der Maße 26,3 cm Ø und 24 cm Höhe angelegt. Das Versuchsdesign war eine randomisierte Block-Anlage (5 Varianten, vierfach wiederholt), die Aufstellung der Gefäße erfolgte im 5 mal 4 Muster (horizontal, vertikal). Als Sorte wurde ‚Parano F1‘ (Fa. Hild, Marbach) ausgewählt. Ausgesät wurde in einem Kreis im Abstand von 2 cm, orientiert im äußeren Bereich des Gefäßes, um im Zentrum der Gefäße Messungen der CO₂-Entbindung aus der Bodenoberfläche durchführen zu können. Die Düngermengen wurden N-äquivalent entsprechend 0 und 80 kg N ha⁻¹, bezogen auf die Gefäßoberfläche, bemessen.

Radieschen (*Raphanus sativus* L. var. *sativus*)

Die Radieschen-Versuche wurden mit Gefäßen der Maße 28,3 cm Ø und 12 cm Höhe angelegt. Als Sorte wurde ‚Raxe‘ (Fa. Hild, Marbach, kalibriert 2,75-3,00 mm) ausgewählt. Ausgesät wurde in einem Kreis im Abstand von 2,5 cm, orientiert im äußeren Bereich des Gefäßes, um im Zentrum der Gefäße Messungen der CO₂-Entbindung aus der Bodenoberfläche durchführen zu können. Das Versuchsdesign war eine randomisierte Block-Anlage (11 Varianten, vierfach wiederholt), die Aufstellung der Gefäße erfolgte im 11 × 4 Muster (horizontal × vertikal).

Die Versuche waren im Forschungsgewächshaus des FB Ökologische Agrarwissenschaften aufgestellt, das Belichtungsprogramm mit Na-Dampf-Lampen war eingestellt auf eine 12h-Belichtungs- und 12h-Dunkelphase. Die Düngermengen wurden N-äquivalent entsprechend 0, 80 und 140 kg N ha⁻¹, bezogen auf die Gefäßoberfläche, bemessen.

Ernte

Die Gefäße wurden komplett beerntet; Anzahl Pflanzen sowie Gewicht der Pflanzen wurden festgehalten. Trockenmasse wurde nach Blatt und Wurzel bzw. Knolle getrennt bestimmt. Nitrat-

Messungen erfolgten mittels Autoanalyser (FIA), N-Gehalte wurden als N_2 nach thermischem Probenaufschluss mit Reduktion und gaschromatographischer Trennung mittels TCD gemessen.

Aus Tabelle 2-5 wird der Zeitplan der Gefäßversuche ersichtlich. Tabelle 2-6 zeigt die Eigenschaften der verwendeten Düngemittel. Hornmehl und Rizinusschrot lagen gebrauchsfertig als Handelsware vor, gleiches galt für das Granulat Phytoperls. Ackerbohnen und Lupinen wurden mit einer Schrotmühle (1 mm Siebeinsatz) beim örtlichen Landhandel geschrotet.

2.2.1.2 Boden

Bei diesen Versuchen wurde Boden des Ap-Horizonts einer Parabraunerde der Hessische Staatsdomäne Frankenhausen, Schlag „Gartenbreite“ verwendet (Ut3, pH_{CaCl_2} 7,1, 1,1 % C, 0,13 % N, 14 mg P_2O_5 100 g^{-1} , 10 mg K_2O 100 g^{-1} , 9 mg MgO 100 g^{-1} ; eigene Messungen und Beprobungspunkt 228 in Brandt *et al.*, 2002).

Bei Brache und Radieschen wurden Bodenuntersuchungen nur für die Varianten entsprechend 80 $kg\ N\ ha^{-1}$ Ackerbohne, Gelbe Lupine, Phytoperls bzw. Rizinusschrot und ohne Düngung durchgeführt.

Die CO_2 -Entbindung aus der Bodenoberfläche wurde im Zentrum der Gefäße mit einem transportablen IR-Messgerät (CIRAS; Blanke, 1996) gemessen (Tabelle 2-5). Leider erwies sich diese Methode als sehr problematisch. Insbesondere das wiederholte Messen am selben Ort führte auf der z.T. sehr festen Bodenoberfläche dazu, dass die Messkammer nicht ausreichend gegen den Boden abgedichtet werden konnte. Weitere Probleme traten direkt nach dem Gießen auf. Im Folgenden wird daher nur ein Teil der Ergebnisse gezeigt. Die Interpretation dieser Ergebnisse muss zudem mit Vorsicht erfolgen. Bei allen CO_2 -Messungen wurde die Bodentemperatur in 3 cm Tiefe mitgemessen. Alle CO_2 -Daten wurden mit Hilfe der Temperaturfunktion des Rothamsted-Modells (Jenkinson *et al.*, 1987) auf $10^\circ C$ standardisiert.

An vier bzw. fünf Terminen wurden Bodenproben aus den dafür vorgesehenen Gefäßen entnommen (Tabelle 2-5). Dazu wurden mit einem sogenannten Wurzelbohrer ($\varnothing = 7\ cm$) Bodenproben ausgestochen. Bei Radieschen und Brache geschah dies auf volle Gefäßtiefe, bei den Möhren auf 9 cm. Die erste Probenahme erfolgte am Tag der Aussaat (Radieschen und Möhre) bzw. des Versuchsbeginns (Brache). Beim Wiederholungsversuch mit Radieschen wurden Bodenproben nur vor dem Einmischen der Dünger und in der Woche der Ernte genommen. Bei der Entnahme der Bodenproben wurde immer mindestens eine Pflanze mitausgestochen. Beim ersten Radieschenversuch wurden nur solche Teile der Gefäße beprobt, welche gleichmäßig bewachsen waren. Da die Versuche mit Brache und Radieschen zusammen angelegt wurden, sind die Bodenwerte vom ersten Probenahmetermin dieser beiden Varianten gleich (Tag der Versuchsanla-

ge). Die Bodenproben wurden ohne weitere Zeitverzögerung und ohne eine weitere Probenaufbereitung im Labor weiter verarbeitet.

Wie im Inkubationsversuch erfolgte an diesen Bodenproben die Messung der mikrobielle Biomasse (C_{mik} und N_{mik}) mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE; Brookes *et al.* 1985; Joergensen, 1996; Joergensen und Mueller, 1994; Vance *et al.* 1987). Im 0,5 M K_2SO_4 -Extrakt wurden gleichzeitig löslicher organischen C und N, sowie mineralischen N gemessen. Um den störenden Einfluss lebender Wurzeln auszuschließen, erfolgte eine Vorbehandlung der Bodenproben. Dabei wurden die in den Proben enthaltene Wurzeln mit einem kombinierten Sieb und Sedimentationsverfahren entfernt (Mueller *et al.* 1996, modifiziert nach Mayer, 2003).

Eine Umrechnung der C- und N-Fractionen in % Dünger-C bzw. -N erfolgte nach Abzug der in der nicht gedüngten Versuchsvariante gemessenen C- und N-Mengen.

$$\% \text{ Dünger-C} = (C_{\text{gedüngt}} - C_{\text{gedüngt}}) / C_{\text{Dünger}} \times 100$$

$$\% \text{ Dünger-N} = (N_{\text{gedüngt}} - N_{\text{gedüngt}}) / N_{\text{Dünger}} \times 100$$

Es sei auch hier darauf hingewiesen, dass es sich dabei nur um rein rechnerische Mengen handelt. Die wirklichen Anteile des Dünger-C bzw. -N in den einzelnen Fraktionen können nur durch Isotopenmarkierung der Düngemittel ermittelt werden, was in dieser Untersuchung nicht der Fall war.

2.2.1.3 Statistik

Zur statistischen Auswertung wurde eine Varianzanalyse (ANOVA, Bodendaten mit repeated measures) mit anschließendem Tukey-Test (Honestly Significant Difference, HSD) durchgeführt.

2.2.2 Ergebnisse und Diskussion

2.2.2.1 Pflanzen

Möhren

Im Gefäßversuch erreichten alle gedüngten Varianten einen signifikant höheren **Frischmasse-Ertrag** als die Kontrollvariante (Tabelle 2-7). Die getesteten Dünger beeinflussten den Ertrag in der Reihung Gelbes Lupinenschrot > Rizinusschrot > Phytoperls > Ackerbohnschrot (Lupinenschrot: 339 g bis Ackerbohnschrot: 290 g), konnten untereinander aber nicht statistisch differenziert werden. Für den **Trockenmasse-Ertrag** konnte nur Rizinusschrot als statistisch unterscheidbar zur Kontrolle ausgewiesen werden; allerdings verursachte Lupinenschrot auch bei diesem Parameter einen höheren Ertrag verglichen mit Phytoperls und Ackerbohnschrot. Aus

dem **N-Ertrag** der Möhren ließ sich eine bessere Düngewirksamkeit von Rizinusschrot und Lupinenschrot gegenüber Phytoperls und Ackerbohnschrot erkennen (Abbildung 2-4). Bezogen auf die applizierten N-Mengen pro Gefäß (441 mg N) führte dies zu einer **N-Effizienz** der Dünger zwischen 19,5 % (Rizinusschrot) und 11,2 % (Ackerbohnschrot).

Radieschen

In dem Gefäßversuch 2 mit Radieschen wurde zusätzlich Hornmehl als Referenzdünger mit einbezogen. Dieser Dünger führte in beiden Düngestufen zu den jeweils höchsten Frischmasseerträgen (206 bzw. 271 g pro Gefäß, Tabelle 2-9). Obschon graduell geringere Erträgen auslösend, konnten weder Rizinusschrot noch Lupinenschrot statistisch von Hornmehl unterschieden werden. Allen Düngervarianten gemeinsam war der signifikante Unterschied zur unbehandelten Kontrolle. Die **N-Aufnahme pro Fläche** zeitigte ein nahezu gleiches Resultat (Tabelle 2-10). Einzige Abweichung dazu: das Ergebnis für Lupinenschrot in der zweiten Düngestufe (140 kg ha^{-1}) lag signifikant unter den Werten von Rizinusschrot und Hornmehl. Die **N-Effizienz der Dünger** lag zwischen 29 % (Hornmehl, 140 kg ha^{-1}) und 12 % (Ackerbohnschrot). Neben Hornmehl wurden auch bei Rizinusschrot und Lupinenschrot mehr als 20 % Dünger-N kalkulatorisch ermittelt. Besonderheit dieses Versuches bestand darin, dass die Düngeneffizienz in der zweiten Düngestufe, von Ackerbohnschrot abgesehen, eine größere N-Effizienz erzielt wurde.

2.2.2.2 Boden

Bei allen gemessenen Variablen, mit Ausnahme der CO_2 -Entbindungsrate, traten höchst signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen auf (Tabelle 2-11). Bei allen gemessenen Variablen gab es zumindest an einzelnen Messterminen signifikante Unterschiede zwischen den Düngemitteln (Abbildung 2-6, Abbildung 2-7).

Zu Beginn waren die Gehalte an mineralischem N in den Leguminosenkörnerschrot-Varianten signifikant höher als in den anderen Varianten (Brache und Radieschen in Abbildung 2-7). Die Netto-N-Mineralisation kam also, noch deutlicher als in den Inkubationsversuchen, nach Düngung von Rizinusschrot langsamer in Gang als nach Düngung von Leguminosenschrot. Diese Beobachtung dürfte mit dem relativ hohen Gehalt an Lignin im Rizinusschrot im Zusammenhang stehen (Tabelle 2-6). Das anfänglich beobachtete Verschwinden von mineralischem N (N_{\min} in Abbildung 2-7) könnte auf eine kurze Phase mit nennenswerter Denitrifikation zurückzuführen sein. Der Wassergehalt in den Töpfen war in den ersten Tagen noch relativ hoch.

Das erst später auftretende Maximum der Netto-N-Mineralisation bei Rizinusschrot führte dann ebenfalls zu signifikant höheren N_{\min} -Gehalten als bei den anderen Varianten (Brache in

Abbildung 2-7). Vom Temperaturregime her sind die Gefäßversuche am ehesten mit den Inkubationsversuchen bei 15°C zu vergleichen, bei denen ähnliches beobachtet wurde (Abbildung 2-2). Bemerkenswert ist bei den Gefäßversuchen allerdings, dass es bei Rizinusschrot nach dem Maximum zu einer erneuten Immobilisation von mineralischem N kommt (Brache in Abbildung 2-7), die so im Inkubationsversuch nicht zu beobachten war.

Der mineralisierte N (N_{\min}) wurde von den Pflanzen vollständig aufgenommen (Radieschen und Möhre in Abbildung 2-7 und Tabelle 2-13).

Z.T. gegenläufige Schwankungen von C_{mik} und N_{mik} deuteten an, dass unterschiedliche Substratquellen von spezifischen, sich in ihrer Zusammensetzung ändernden, Mikroorganismen-Populationen zeitversetzt abgebaut wurden (C_{mik} in Abbildung 2-6 und N_{mik} in Abbildung 2-7). Im Durchschnitt lagen die mikrobiellen Biomassen (C_{mik} und N_{mik}) nach Anwendung von Leguminosenkörnerschroten (z.T. signifikant) über den mikrobiellen Biomassen bei den anderen Varianten. Dies gilt auch relativ zur gedüngten C- bzw. N-Menge (Tabelle 2-12, Tabelle 2-13). Zwischen 20 und 50 % des Leguminosen-C und zwischen 18 und 35 % des Leguminosen-N wurde rein rechnerisch vorübergehend in der mikrobiellen Biomasse festgelegt. Bei Rizinusschrot waren dies nur ca. 7 % Dünger-C und bei Rizinusschrot und Phytoperls nur um die 10 % Dünger-N. Offensichtlich wird ein besonders großer Teil des Leguminosen-C und -N durch die mikrobielle Biomasse immobilisiert, dann teilweise in mikrobielle Residualprodukte überführt und erst später (re-)mineralisiert. Das relativ weite C/N-Verhältnis des Ackerbohnschrots scheint diesen Prozess noch zu verstärken. Der hohe maximale Anteil Dünger-C in der mikrobiellen Biomasse bei Phytoperls steht im Gegensatz zum zeitgleichen Anteil Dünger-N in der mikrobiellen Biomasse. Dieses Phänomen ist schwer zu interpretieren und mag auch vor dem Hintergrund der einfachen Differenzrechnung gesehen werden. An dem entsprechenden Termin lag der mikrobielle Biomasse-C relativ niedrig, was rechnerisch zu relativ großen Mengen an Dünger-C in den Biomasse-Fractionen führt.

Lösliche organische Fraktionen aus den Düngemitteln (TOC_{ext} in Abbildung 2-6 und TON_{ext} in Abbildung 2-7) wurden erwartungsgemäß schnell abgebaut. Insbesondere bei Rizinusschrot und Gelber Lupine kommt es aber vorübergehend zu einer Anreicherung von rechnerisch 30% und mehr des Dünger-N in der Fraktion TON_{ext} (Abbildung 2-6, Tabelle 2-12). Bei Rizinusschrot liegt dieses Maximum zeitgleich mit dem N_{\min} -Maximum. Das zeitgleiche Minimum des mikrobiellen Biomasse N (N_{mik} in Abbildung 2-6) kann damit jedoch nicht in Verbindung gebracht werden, da es bei allen Varianten auftritt.

Zunächst mobilisierter TON_{ext} verschwand im Laufe der Zeit wieder. Die TON_{ext} -Maxima sind bei Brache, Radieschen und Möhre sowohl hinsichtlich des Zeitpunkts als auch des Umfangs unterschiedlich ausgeprägt. Bei Radieschen und Möhre sind die Maxima niedriger und

verschwinden früher als bei Brache. Entweder förderten also die lebenden Wurzeln den mikrobiellen Abbau oder nahmen N-reiche lösliche organische Verbindung direkt auf.

Verglichen mit den anderen Düngemitteln lag der Umsatz von Phytoperls immer im unteren Bereich. Eine Ausnahme stellt lediglich die errechnete Einlagerung von über 50% des Dünger C in die mikrobielle Biomasse unter Möhren dar (C_{mik} in Abbildung 2-6 und in Tabelle 2-12)

Zwischen dem vorletzten und dem letzten Probenahmetermin nahmen bei Brache die gemessenen N- und C-Fractionen in vielen Düngungsvarianten ab. Als Senke für diese Immobilisation kommt, wenn man beim N von nennenswerter Denitrifikation absieht, daher nur die mikrobielle Residualmasse (mikrobielle Nekromasse und Exsudate) in Betracht.

Am Versuchsende liegen rechnerisch insgesamt nur zwischen 8 und 26 % des Dünger-N in den gemessenen Bodenfraktionen oder der geernteten Sprossmasse vor (Tabelle 2-22). Dies entspricht zwischen 19 und 37 % des zuvor als Maximum in den Bodenfraktionen gemessene Dünger-N. Die Differenz von 36 bis 81 % des Dünger-N ist Bestandteil des Rest-N im Boden und muss nach mikrobiellem Umsatz entweder in Wurzelmasse oder in mikrobiellen Residualprodukten vorliegen. Eine Remineralisation aus diesen vermutlich leicht umsetzbaren Fraktionen zu späterem Zeitpunkt ist sehr wahrscheinlich.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild: Leguminosenkörnerschrote wurden zunächst schneller umgesetzt als Rizinusschrot. Dabei kam es bei gelber Lupine verstärkt zur N-Mineralisation, während bei Ackerbohne, möglicherweise auf Grund des weiteren C/N-Verhältnisses, ein größerer Anteil in die mikrobielle Biomasse eingelagert wurde. Im weiteren Verlauf wird dann jedoch mehr N aus Rizinusschrot mineralisiert als aus den Leguminosenkörnerschroten. Ob Gelbe Lupine oder Rhizinusschrot in diesem Versuch die höchste Netto-N-Mineralisation zeigten, ist wegen den zeitlich versetzten Maxima und der möglicherweise am Anfang bedeutenden Denitrifikation schwer zu beurteilen.

Ein erheblicher Teil des hoch verfügbaren Dünger- N wurde in die mikrobielle Biomasse eingelagert und/oder endet vorläufig in mikrobiellen Residuen. Eine spätere Mineralisation aus dieser Fraktion ist zu erwarten. Lebende Wurzeln nehmen organischen-N direkt auf und/oder fördern den Umsatz von löslichen organischen N-Fractionen.

Tabelle 2-5: Zeitplan der Gefäßversuche. M = Mischen von Dünger und Boden

A = Füllen der Gefäße und Aussaat, R = Messung der CO₂-Entbindung aus dem Boden, B = Entnahme von Bodenproben, E = Ernte. Radieschen 2 = Wiederholungsversuch wegen Umfallkrankheit im Versuch Radieschen 1.

Datum	Brache	Radieschen 1	Möhre	Radieschen 2
25.10.2002	M	M		
02.11.2002	A, B	A, B		
04.11.2002	R	R		
12.11.2002	R	R		
18.11.2002		B		
19.11.2002	R	R		
20.11.2002	B			
26.11.2002	R	R		
29.11.2002			M	
02.12.2002		B		
03.12.2002	R			
04.12.2002	B			
07.12.2002			A	
09.12.2002			B	
10.12.2002	R	R	R	
16.12.2002		B		
17.12.2002	R	R	R	
18.12.2002	B			
20.12.2002		E		
27.12.2002	R		R	
06.01.2003			B	
07.01.2003	R		R	
14.01.2003	R		R	
21.01.2003	R		R	
27.01.2003	B			
28.01.2003			R	
03.02.2003			B	
04.02.2003			R	
11.02.2003			R	
25.02.2003			R	
18.03.2003			R	
24.03.2003			B	M, B
12.05.2003				B
13.05.2003			E	
14.05.2003				E
15.05.2003			B	

Tabelle 2-6: C- und N-Gehalte sowie Gehalte der van Soest Fraktionen Cellulose, Hemizellulose und Lignin der in den Gefäßversuchen eingesetzten Düngemittel.

Die Fraktionen „Cellulose“, „Hemizellulose“ und „Lignin“ charakterisieren vor allem die unterschiedliche Löslichkeit in Säuren. Sie stellen, insbesondere beim Hornmehl, nicht unbedingt einheitliche chemische Stoffgruppen dar. TM = Trockenmasse

Dünger	C _t [% TM]	N _t [%TM]	C _t /N _t	Lignin [%TM]	van Soest Analyse	
					Hemizellulose [%TM]	Zellulose [%TM]
Ackerbohne (Körnerschrot)	44,5	4,4	10,0	1,7	18,2	11,3
Gelbe Lupine (Körnerschrot)	46,8	7,0	6,7	1,6	3,9	16,2
Phytoperls (Granulat)	41,3	8,0	5,2	31,1	20,7	1,2
Rizinusschrot	48,2	5,7	8,5	31,3	9,7	9,1
Hornmehl	49,7	15,3	3,3	37,5	11,0	2,2

Tabelle 2-7: Frischmasse (FM)- und Trockenmasse (TM)-Erträge [g / 20 Pflanzen / Gefäß] nach Anwendung verschiedener vegetabiler Dünger im Gefäßversuch mit Möhren.

Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede (Tukey, $P \leq 0,05$).

Düngung [kg N /ha]	FM-Ertrag		TM-Ertrag	
	0	80	0	80
Kontrolle	191,6 b		16,4 b	
Rizinusschrot		336,4 a		32,3 a
Ackerbohnschrot		290,5 a		24,3 ab
Lupinenschrot		338,6 a		27,0 ab
Phytoperls		320,5 a		25,0 ab

Tabelle 2-8: N-Ertrag [mg N/ 20 Pflanzen / Gefäß] nach Anwendung verschiedener vegetabiler Dünger im Gefäßversuch mit Möhren.

Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede (Tukey, $P \leq 0,05$).

Düngung [kg N /ha]	0	80
Kontrolle	65,8 b	
Rizinusschrot		151,8 a
Ackerbohnschrot		115,3 a
Lupinenschrot		131,8 a
Phytoperls		125,0 a

Tabelle 2-9: Frischmasse (FM) –Erträge (Knolle + Blatt) [g / 20 Pflanzen / Gefäß] nach Anwendung verschiedener vegetabiler Dünger im Gefäßversuch mit Radieschen.

Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede (Tukey, $P \leq 0,05$).

Düngung [kg N/ha]	0	80	140
Kontrolle	45,8 f		
Rizinusschrot		200,4 c	261,2 ab
Ackerbohnschrot		129,5 e	170,7 cde
Lupinenschrot		189,0 cd	263,7 a
Phytoperls		140,0 de	209,4 bc
Hornmehl		206,1 c	270,6 a

Tabelle 2-10: N-Ertrag (Knolle + Blatt) [mg N / 20 Pflanzen / Gefäß] nach Anwendung verschiedener vegetabiler Dünger im Gefäßversuch mit Radieschen.

Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede (Tukey, $P \leq 0,05$).

Düngung [kg N/ha]	0	80	140
Kontrolle	75,7 f		
Rizinusschrot		187,2 cd	334,7 a
Ackerbohnschrot		136,1 e	183,1 cde
Lupinenschrot		189,9 cd	277,9 b
Phytoperls		143,2 de	220,0 c
Hornmehl		214,3 c	330,4 a

Tabelle 2-11: F-Tabelle (ANOVA mit repeated measures) für den Faktor Zeit bei den Gefäßversuchen.

*** = Signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen ($P \leq 0,001$).

Messgröße	Brache	Radieschen	Möhre
CO ₂ -Entbindungsrate	1,3n.s.	1,3n.s.	0,8n.s.
mineralischer N	5 ***	135 ***	95 ***
mikrobieller Biomasse-C	29 ***	42 ***	21 ***
mikrobieller Biomasse-N	94 ***	87 ***	78 ***
K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer C	23 ***	18 ***	12 ***
K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer N	37 ***	137 ***	22 ***

Tabelle 2-12: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen C-Pools bei den Gefäßversuchen.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-C. Radieschen 2 = Wiederholungsversuch wegen Umfallkrankheit im Versuch Radieschen 1.

	mikrobieller Biomasse-C		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer C	
	Maximalwerte [% Dünger-C]	Versuchsende [% Dünger-C]	Maximalwerte [% Dünger-C]	Versuchsende [% Dünger-C]
Brache				
Rizinusschrot	7,9	0,5	1,3	0,8
Ackerbohne	22,9	-2,3	2,3	-0,2
Gelbe Lupine	20,1	-6,2	1,8	0,1
Phytoperls	18,3	-19,4	4,8	1,5
Radieschen (1)				
Rizinusschrot	7,9	0,6	1,3	-0,6
Ackerbohne	22,9	5,6	2,3	-0,5
Gelbe Lupine	20,1	3,7	1,8	0,0
Phytoperls	18,3	-6,5	4,8	0,4
Radieschen (2)				
Rizinusschrot	n.g.	-0,8	n.g.	-0,6
Ackerbohne	n.g.	1,4	n.g.	-0,3
Gelbe Lupine	n.g.	-1,9	n.g.	-1,0
Phytoperls	n.g.	-6,7	n.g.	0,3
Möhren				
Rizinusschrot	7,0	0,3	2,6	0,4
Ackerbohne	25,0	2,8	1,6	1,1
Gelbe Lupine	47,9	1,5	2,0	1,6
Phytoperls	56,9	-7,1	5,8	4,5

Tabelle 2-13: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen N-Pools bei den Gefäßversuchen.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-N. n.g. = nicht gemessen. Radieschen 2 = Wiederholungsversuch wegen Umfallkrankheit im Versuch Radieschen 1.
Fortsetzung nächste Seite.

	mineralischer N		mikrobieller Biomasse-N		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer N	
	Maximalwerte	Versuchsende	Maximalwerte	Versuchsende	Maximalwerte	Versuchsende
	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]
Brache						
Rizinusschrot	33,6	15,2	10,5	5,1	36,3	0,6
Ackerbohne	21,4	1,1	30,6	15,9	12,7	-0,1
Gelbe Lupine	34,5	15,3	18,1	10,3	42,1	0,7
Phytoperls	14,2	4,7	11,9	4,2	21,0	2,1
Radieschen (1)						
Rizinusschrot	19,5	0,7	10,5	3,5	19,8	1,2
Ackerbohne	21,4	0,3	30,6	22,2	12,7	0,3
Gelbe Lupine	34,5	0,8	18,1	16,3	27,4	1,1
Phytoperls	11,5	0,1	13,3	2,1	21,0	0,8
Radieschen (2)						
Rizinusschrot	n.g.	0,0	n.g.	-1,1	n.g.	0,0
Ackerbohne	n.g.	0,0	n.g.	5,0	n.g.	-0,1
Gelbe Lupine	n.g.	0,2	n.g.	0,7	n.g.	-0,9
Phytoperls	n.g.	0,7	n.g.	-2,7	n.g.	0,2
Möhren						
Rizinusschrot	27,1	-0,3	9,7	-2,0	29,0	-0,4
Ackerbohne	28,9	-1,7	35,4	9,2	34,1	1,2
Gelbe Lupine	44,2	-1,3	28,1	5,3	30,5	0,8
Phytoperls	21,0	0,1	11,9	-7,2	27,0	2,1

Fortsetzung Tabelle 2-13

	Summe N (Boden)		Spross-N	Summe N (Boden + Spross)	Rest N Boden
	Maximalwerte	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende
	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]
Brache					
Rizinusschrot	78,7	21,0	0,0	21,0	79,0
Ackerbohne	64,7	16,9	0,0	16,9	83,1
Gelbe Lupine	69,4	26,2	0,0	26,2	73,8
Phytoperls	44,3	11,1	0,0	11,1	88,9
Radieschen (1)					
Rizinusschrot	47,8	5,3	n.g	n.g	n.g
Ackerbohne	64,7	22,8	n.g	n.g	n.g
Gelbe Lupine	64,5	18,2	n.g	n.g	n.g
Phytoperls	44,3	3,1	n.g	n.g	n.g
Radieschen (2)					
Rizinusschrot	n.g.	-1,2	21,9	20,7	79,3
Ackerbohne	n.g.	5,0	11,8	16,8	83,2
Gelbe Lupine	n.g.	0,1	22,4	22,5	77,5
Phytoperls	n.g.	-1,9	13,7	11,8	88,2
Möhren					
Rizinusschrot	45,6	-2,7	19,5	16,8	83,2
Ackerbohne	75,1	8,7	11,2	20,0	80,0
Gelbe Lupine	84,4	4,9	15,0	19,8	80,2
Phytoperls	44,3	-5,0	13,4	8,4	91,6

[% Dünger-N]

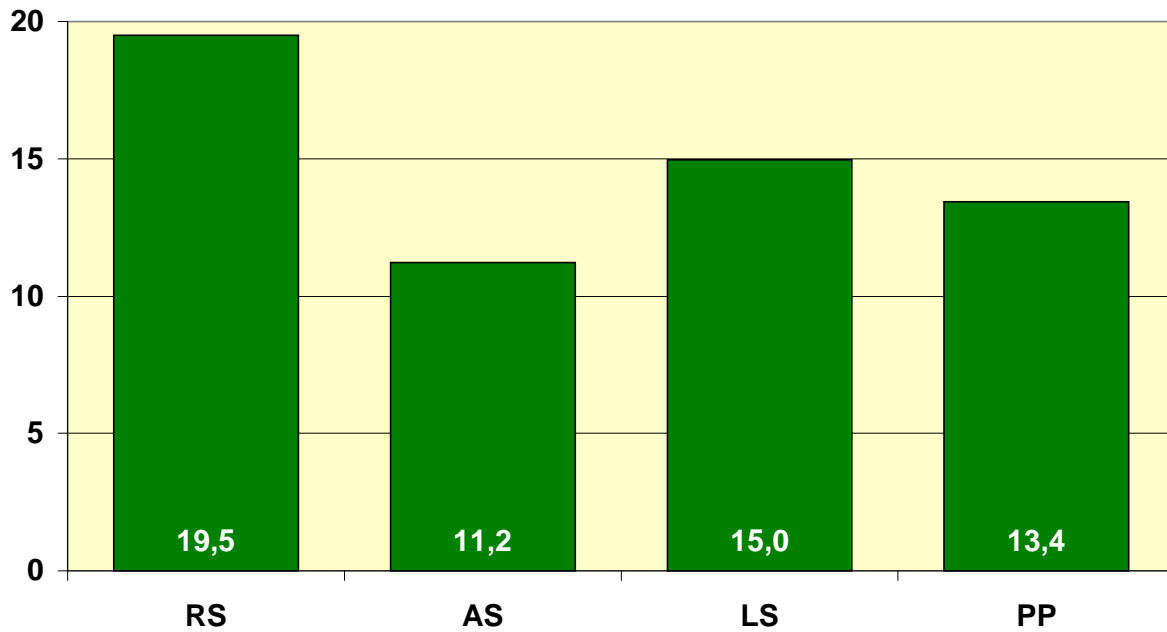


Abbildung 2-4: N-Effizienz vegetabler Dünger bei Möhren im Gefäßversuch

(RS: Rizinusschrot; AS: Ackerbohenschrot; LS: Lupinenschrot; PP: Phytoperls)

[% Dünger-N]

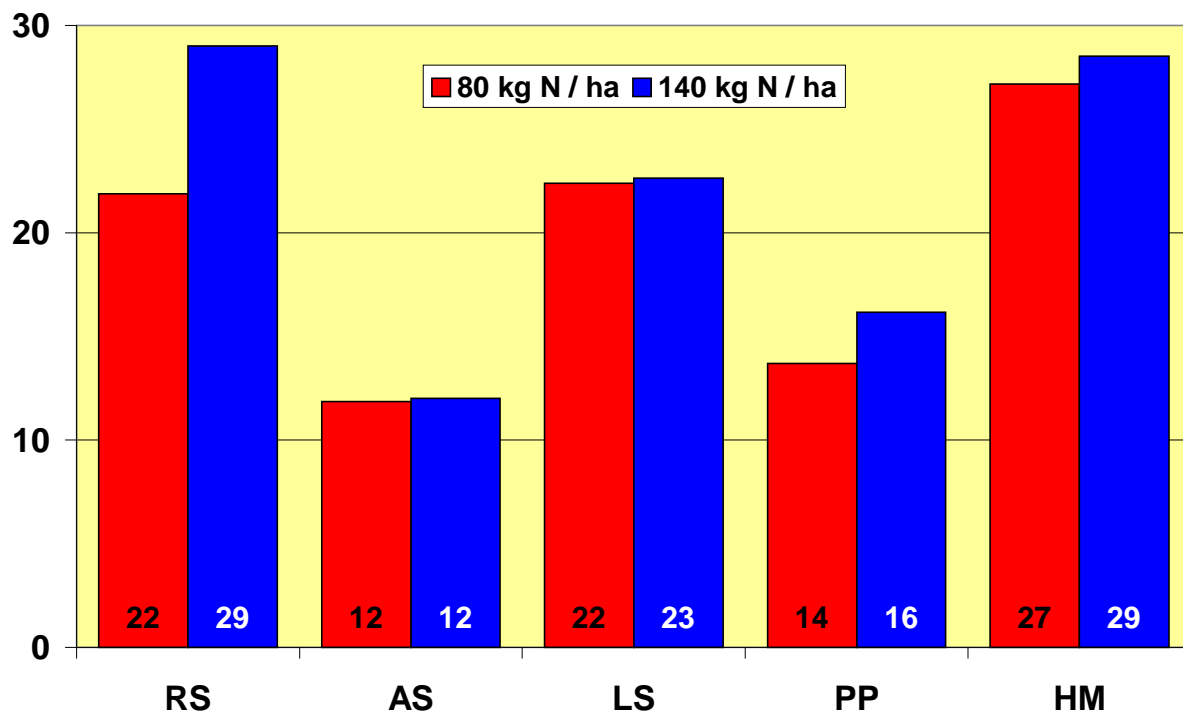


Abbildung 2-5: N-Effizienz vegetabler Dünger bei Radieschen im Gefäßversuch

(RS: Rizinusschrot; AS: Ackerbohenschrot; LS: Lupinenschrot; PP: Phytoperls; HM: Hornmehl)

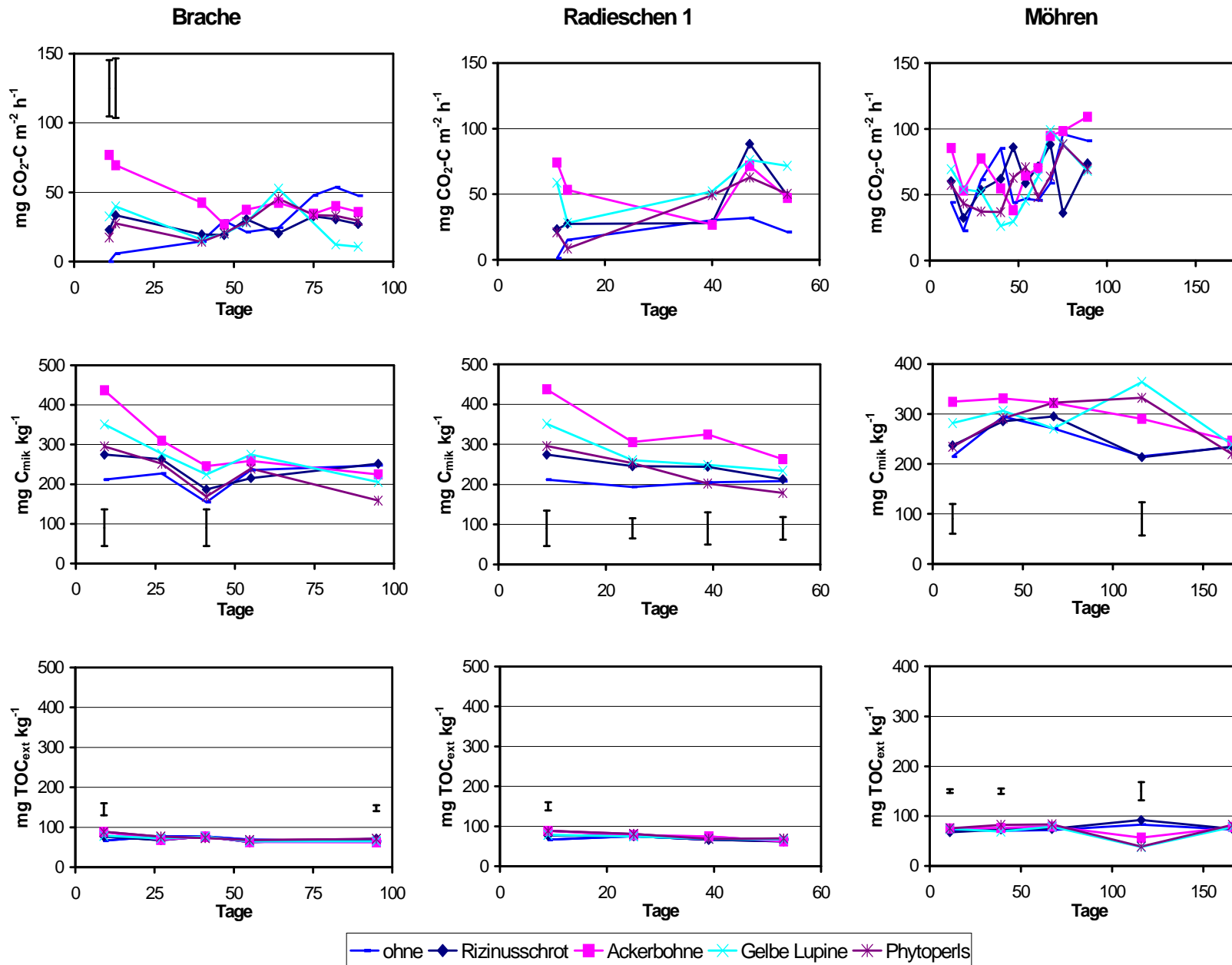


Abbildung 2-6: Zeitverläufe der Rate der CO₂-Entbindung aus dem Boden, des mikrobiellen Biomasse C (C_{mik}) und des K₂SO₄-extrahierbaren organischen C (TOC_{ext}) im Boden bei den Gefäßversuchen.

Die Balken zeigen die Honestly Significant Difference (Tukey, $P \leq 0,05$) zwischen den Düngervarianten sofern signifikante Unterschiede vorlagen. Radieschen (1) bezeichnet den ersten Gefäßversuch mit Radieschen.

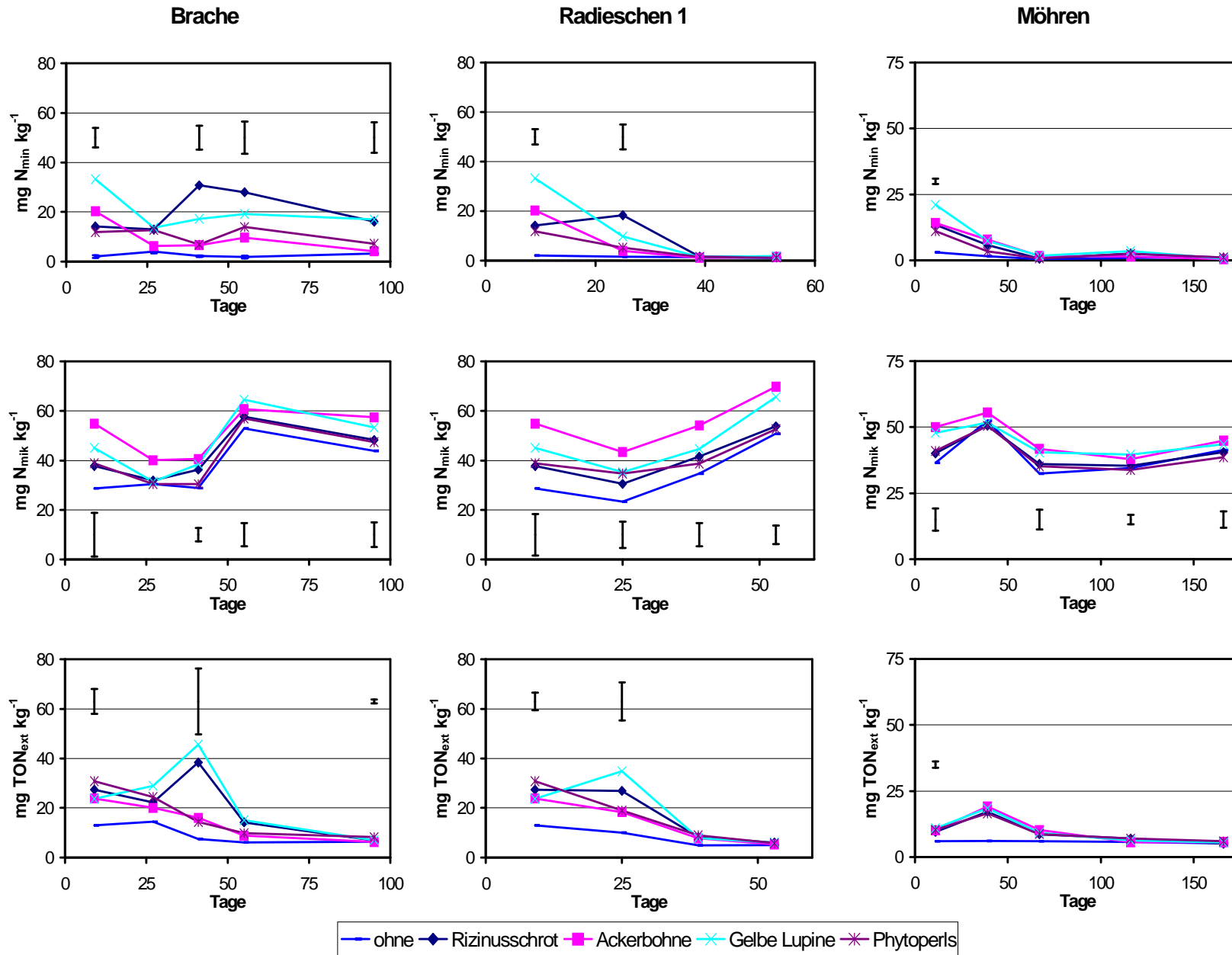


Abbildung 2-7: Zeitverläufe der mineralischen N (N_{\min}), des mikrobiellen Biomasse N (N_{mik}) und des K_2SO_4 -extrahierbaren organischen N (TON_{ext}) im Boden bei den Gefäßversuchen.

Die Balken zeigen die Honestly Significant Difference (Tukey, $P \leq 0,05$) zwischen den Düngervarianten sofern signifikante Unterschiede vorlagen. Radieschen (1) bezeichnet den ersten Gefäßversuch mit Radieschen.

2.3 Feldversuche

2.3.1 Material und Methoden

2.3.1.1 Versuchsanlage und Ernte

Die Parzellenversuche wurden auf Flächen der Hessischen Staatsdomäne Frankenhäusen (Schlag: Gartenbreite) angelegt. Die Vorfrüchte auf der Fläche waren in 2002 Winterroggen mit einem Zwischenfrucht-Gemenge (Blaue Lupine-Phacelia), in 2001 Winterweizen. Insgesamt wurden Versuche mit drei Kulturen durchgeführt: Weißkohl, Radieschen, Möhre. In den Versuchen mit Radieschen war eine Brache-Variante integriert (siehe unten).

Weißkohl (*Brassica oleracea* L. convar. *capitata*)

Der Parzellenversuch mit Weißkohl wurde als Lateinisches Quadrat (5 Varianten fünffach wiederholt) angelegt. Die Parzellen hatten eine Größe von 3 x 6 m und waren in einem Muster 5 (horizontal) mal 5 (vertikal) verteilt. Als schnellwüchsige Sorte wurde *Sunta F1* (Fa. Hild, Marbach) ausgewählt, deren Jungpflanzen (Anzucht durch Fa. Gaiser-Fischer, Walddorfhäslach) in der Anordnung 40 cm in der Reihe und 50 cm zwischen den Reihen gesetzt wurden. Die N-äquivalenten Düngermengen betragen 0, 120 bzw. 240 kg N ha⁻¹.

Pro Parzelle wurden 40 Köpfe geerntet, einzeln gewogen, geputzt und für Bonituren und TM-Messung aufgearbeitet. Die Trockenmasse-Messung wurde bei 80°C bis zur Gewichtskonstanz durchgeführt.

Radieschen (*Raphanus sativus* var. *sativus*)

Das Versuchsdesign war eine Randomisierte Blockanlage (9 Varianten, vierfach wiederholt). Die Verteilung der 3 x 5 m großen Parzellen erfolgte in einem 9 x 4-Muster (horizontal, vertikal). Als Sorte wurde ‚Raxe‘ (Fa. Hild, Marbach, kalibriert 2,75-3,00 mm) ausgewählt. Ausgesät wurde mit einem Einzelkorn-Sägerät der Fa. Hege, die Ablage war auf 2-2,5 cm in der Reihe bemessen. Die N-äquivalenten Düngermengen betragen 0, 80 bzw. 140 kg N ha⁻¹.

Zur Beerntung des Versuches wurden jeweils 3 Reihen à 50 cm beprobt, was insgesamt einer Fläche von 0,321 m² entsprach.

In die Parzellen des Radieschenversuchs wurden Plastikzylinder (Höhe = 30 cm, Ø = 30 cm) in den Boden getrieben und brach gehalten. Diese wurden als Brache-Variante im Versuch mitgeführt.

Möhren (*Daucus carota* L. ssp. *sativus*)

Der Feldversuch mit Möhren entsprach in seiner Anlage im Prinzip dem Feldversuch mit Radieschen. Allerdings wurden die Möhren in jeweils vier Reihen auf Dämmen angebaut.

Obwohl die Ernte nicht ausgewertet werden konnte, soll der Versuch angesichts seines detaillierten Programms an untersuchten Boden-Parametern mit einbezogen werden; lässt er doch Analogieschlüsse zu den anderen Ergebnissen der anderen Feldversuche zu.

Der Zeitplan der Feldversuche geht aus Tabelle 2-14 hervor. Tabelle 2-15 zeigt die Eigenschaften der verwendeten Düngemittel. Rizinusschrot lag gebrauchsfertig als Handelsware vor, gleiches galt für das Granulat Phytoperls. Ackerbohnen und Lupinen wurden mit einer Schrotmühle (1 mm Siebeinsatz) beim örtlichen Landhandel geschrotet.

2.3.1.2 Boden

Die Versuche fanden auf dem Schlag „Gartenbreite“ der Hessischen Staatsdomäne Frankenhau- sen mit folgenden Bodeneigenschaften in den Ap-Horizonten statt:

Brache, Radieschen und Kohl: Kolluvisol, Ut3, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 7,2, 1,4 % C_t , 0,15 % N_t , , 27 mg P_2O_5 100 g^{-1} , 19 mg K_2O 100 g^{-1} , 9 mg Mg 100 g^{-1} (Beprobungspunkt 293 in Brandt *et al.*, 2002)

Möhren: Kolluvisol, Ut3, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 7,2, 1,2 % C_t , 0,12 % N_t , , 19 mg P_2O_5 100 g^{-1} , 15 mg K_2O 100 g^{-1} , 9 mg Mg 100 g^{-1} (Beprobungspunkt 267 in Brandt *et al.*, 2002)

Alle Bodenbeprobungen (Tabelle 2-14) und –messungen erfolgten in den frühen Morgenstunden zwischen 05:00 und 10:00 Uhr.

Die CO_2 -Entbindung aus der Bodenoberfläche wurde im Versuchsverlauf mehrmals mit einem transportablen IR-Messgerät (CIRAS; Blanke, 1996) gemessen (Tabelle 2-15). Alle Messungen erfolgten innerhalb der Reihen bzw. auf den Dämmen (Möhren). Auch hier gab es mit unter technische Probleme, weshalb nicht alle Werte gezeigt werden. Bei allen CO_2 -Messungen wurde die Bodentemperatur in 3 cm Tiefe mitgemessen. Die CO_2 -Daten wurden mit Hilfe der Temperaturfunktion des Rothamstedmodells (Jenkinson *et al.*, 1987) auf 10°C standardisiert.

Die jeweils erste und letzte Beprobungen (Tabelle 2-15) jeder Kultur wurde in vier Tiefenstufen vorgenommen (0-15 cm, 15-30 cm, 60-60 cm und 60-90 cm). Dazwischen wurden zwei Tiefenstufen beprobt (0-15 cm und 15-30 cm). Die obersten 15 cm wurden mit dem bereits erwähnten Wurzelbohrer ($\text{Ø} = 7$ cm) genommen. Die Beprobung der Tiefenstufe 15-30 cm erfolgte mit dem Flügelbohrer. Die beiden unteren Tiefenstufen wurden mit einem dreiteiligen Pürkhauerbohrer beprobt. In allen Parzellen wurden Mischproben aus vier einzelnen Einstichen (je zwei in den Reihen und zwei zwischen den Reihen) hergestellt. Bei Möhren wurden Proben nur auf den

Dammkämmen genommen. Die Bodenproben wurden ohne weitere Zeitverzögerung ins Labor transportiert (ca. 45 Minuten) und dort ohne weitere Probenaufbereitung verarbeitet.

Zunächst wurden störende Wurzeln mit einem kombinierten Sieb und Sedimentationsverfahren entfernt (Mueller *et al.* 1996, modifiziert nach Mayer, 2003). An den feuchten Bodenproben erfolgte dann die Messung der mikrobiellen Biomasse (C_{mik} und N_{mik}) mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE; Brookes *et al.* 1985; Joergensen, 1996; Joergensen und Mueller, 1994; Vance *et al.* 1987). Im 0,5 M K_2SO_4 -Extrakt wurden gleichzeitig löslicher organischer C und N, sowie mineralischen N gemessen. In den Tiefenstufen 15-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm erfolgte nur die Messung des mineralischen N im 0,5 M K_2SO_4 -Extrakt.

Um den Leserinnen und Lesern insbesondere für N geläufige Größenordnungen an die Hand zu geben, wurden die Bodendaten unter Annahme einer durchschnittlichen Lagerungsdichte der Oberböden aus Löss auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen von $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ (berechnet aus Brandt (2001)) für jede Tiefenstufe auf die Fläche hochgerechnet [z.B. kg N ha^{-1}]. Für Möhren sind diese Daten allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, da hier nur Bodenproben auf den Dämmen genommen wurden und sich ferner durch die Dämme eine stark undulierende Bodenoberfläche ergibt. Eine einfache Übertragung der punktuell gemessenen Werte auf die Fläche ist daher für Möhren eigentlich nicht zulässig. Relative Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten werden durch diese Umrechnung jedoch nicht beeinflusst und können ungeachtet dessen interpretiert werden.

Eine Umrechnung der C- und N-Fractionen in % Dünger-C bzw. -N erfolgte nach Abzug der in der nicht gedüngten Versuchsvariante gemessenen C- und N-Mengen.

$$\% \text{ Dünger-C} = (C_{\text{gedüngt}} - C_{\text{gedüngt}}) / C_{\text{Dünger}} \times 100$$

$$\% \text{ Dünger-N} = (N_{\text{gedüngt}} - N_{\text{gedüngt}}) / N_{\text{Dünger}} \times 100$$

Es sei auch hier wieder darauf hingewiesen, dass es sich dabei nur um rein rechnerische Mengen handelt. Die wirklichen Anteile des Dünger-C bzw. -N in den einzelnen Fraktionen können nur durch Isotopenmarkierung der Düngemittel ermittelt werden, was in dieser Untersuchung nicht der Fall war.

2.3.1.3 Statistik

Zur statistischen Auswertung wurde eine Varianzanalyse (ANOVA, Bodendaten mit repeated measures) mit anschließendem Tukey-Test (Honestly Significant Difference, HSD) durchgeführt.

2.3.2 Ergebnisse und Diskussion

2.3.2.1 Witterung

Tabelle 2-16 fasst die monatlichen Wetterdaten, aufgezeichnet durch die ca. 7 km entfernte Wetterstation der Ultraleichtflugschule Calden, zusammen. Die Niederschlagsmengen in Frankenhäusern lagen allerdings in diesem Jahr noch deutlich niedriger als an der Wetterstation (monatlich mindestens 20 mm niedriger). Insgesamt ist der Versuchszeitraum daher als überdurchschnittlich trocken, zu kennzeichnen. Zum Auspflanzen des Weißkohls musste deshalb bewässert werden. Alle Versuche begannen im sehr kühlen zeitigen Frühjahr mit immer noch auftretendem Frost (März und April). Auch im Mai lagen die Nachttemperaturen mitunter noch dicht am Gefrierpunkt. Im Mai, Juni und Juli konnten mit Temperaturen über 30°C zumindest an einzelnen Tagen ausgesprochen hohe Maximaltemperaturen gemessen werden, was zusätzlich zu den geringen Niederschlägen eine relativ hohe Evaporation bewirkte. Juni und Juli waren daher extrem trocken. Dem waren die Versuche mit Radieschen und die Brache aber nur noch kurz ausgesetzt. Der Versuch mit Kohl dauerte immerhin bis Mitte Juni, während der Versuch mit Möhren auch den hochsommerlichen Temperaturen im Juli ausgesetzt war.

2.3.2.2 Pflanzen

Weißkohl

Der **Frischmasseertrag** des Weißkohls erreichte für die Rohware in der Kontrollvariante ohne Düngung ein Niveau von 674 dt/ha (Abbildung 2-8). Die beiden getesteten Dünger (Rizinus-schrot und Lupinenschrot) lösten nahezu vergleichbare Ertragssteigerungen aus, in der Stufe 1 (120 kg N ha⁻¹) ca. 31 % in Stufe 2 (240 kg N ha⁻¹) ca. 57 %. Als Handelsware (**Einzelkopfgewichte**) veränderte sich diese Proportion noch auf 42 % bzw. 74 % (Abbildung 2-9). Hier bewirkte das eingesetzte Lupinenschrot gegenüber dem Rizinusschrot unwesentlich höhere, statistisch nicht zu differenzierende Auswirkungen. Alle Behandlungen waren dagegen signifikant von der Kontrollvariante unterschieden. Infolge der hohen Streuungen innerhalb der Versuchsdaten konnten für die gemessenen **Nitratgehalte** keine statistische Unterscheidbarkeit zwischen Kontrolle und behandelten Varianten ermittelt werden (Abbildung 2-11). Interessant erscheint dennoch die Beobachtung, dass Lupinenschrot zwischen 73 und 81 % des NO₃-Niveaus der jeweiligen Rizinusschrot-Variante erreichte. Vergleichbare Resultate wurden schon in Versuchen mit Spinat gefunden (Kalauch et al. 2001). Die **N-Aufnahme** der Kohlpflanzen lag in der Spanne zwischen 106 kg N/ha für die Kontrolle und 204 bzw. 208 kg N/ha für Stufe 2 (240 kg N ha⁻¹) (Abbildung 2-10). In Stufe 1 (120 kg N ha⁻¹) wurden 158 bzw. 166 kg N ha⁻¹ ermittelt. Alle Mittelwerte der Behandlungen unterschieden sich signifikant zur Kontrolle. Die berechnete N-

Ausnutzung (Abbildung 2-12) erreichte ein Niveau zwischen 43 und 51 % in Stufe 1 (120 kg N ha⁻¹) und 41 und 43 % in Stufe 2 (240 kg N ha⁻¹). Damit lag sie deutlich über den Vergleichswerten des Versuches mit Radieschen (siehe unten). Eine um 25 Tage längere Vegetationsdauer sowie ein höherer N-Bedarf der Kopfkohl-Kultur dürften dies mit bewirkt haben.

Radieschen

Die Radieschen erreichten einen **Gesamt-Frischmasseertrag** (Tabelle 2-17) zwischen 383 dt/ha (Kontrolle) und 570 dt/ha (Rizinusschrot, 140 kg N ha⁻¹). Zwischen Kontrolle und Düngestufe 1 (80 kg N ha⁻¹) konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden, ebenso für Ackerbohnschrot in Düngestufe 2 (140 kg N ha⁻¹). Die große Streuung innerhalb des Versuches ermöglichte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngern beider Düngestufen.

Für den **N-Ertrag** konnten keine Signifikanzen ausgewiesen werden (Tabelle 2-18). Dennoch bemerkenswert ist die Tatsache, dass Lupinenschrot in beiden Düngestufen den jeweils höchsten Wert erreichte, also die N-Aufnahme vor allem von diesem Dünger am meisten gefördert wurde. Für die **N-Effizienz** der eingesetzten Dünger bedeutete dies, rechnerisch wurde der Stickstoff aus Lupinenschrot zu 21 bzw. 16 % ausgenutzt. Die übrigen Dünger ordnen sich in der Sequenz Rizinusschrot, Phytoperls und Ackerbohnschrot.

Der **Nitrat-Gehalt in den Radieschen-Knollen** wurde uneinheitlich beeinflusst. Während Rizinusschrot und Lupinenschrot in der zweiten Düngestufe erwartungsgemäß den Gehalt weiter erhöhten, blieb dies in den Varianten der beiden anderen Dünger aus. Bei Lupinenschrot-Anwendung wurde in Düngestufe deutlich weniger Nitrat vorgefunden als bei Anwendung von Rizinusschrot. Alle Ergebnisse wiesen allerdings keine Signifikanz auf.

Möhren

Aufgrund eines Verfahrensfehlers während der Beerntung des Möhrenversuches ist eine statistische Auswertung dieses Feldversuches bedauerlicherweise nicht möglich.

2.3.2.3 Boden

Bei allen gemessenen Variablen, mit Ausnahme des K₂SO₄-extrahierbaren organischen C, traten höchst signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen auf (Tabelle 2-20). Bei allen gemessenen Variablen gab es zumindest an einzelnen Messterminen signifikante Unterschiede zwischen den Düngemitteln (Abbildung 2-6, Abbildung 2-7).

Bei keinem der Versuche traten zwischen den gedüngten Varianten signifikante Unterschieden der CO₂-Entbindung aus dem Boden auf (Abbildung 2-14). Tendenziell ist jedoch festzustellen, dass die höheren Düngersaufwandmengen auch zu einer höheren CO₂-Entbindung führen. Bei

Brache und Radieschen waren die Unterschiede zwischen den Varianten 140 kg N/ha Gelber Lupine und ohne Düngung signifikant. Tendenzielle Unterschiede bei der CO₂-Entbindung während in der Anfangsphase zwischen Gelber Lupine und Rizinusschrot waren nicht einheitlich. In der Anfangsphase kommt, auch in den Varianten mit Gemüsekulturen, als Quelle für die CO₂-Entbindung im wesentlichen C aus den Düngemitteln in Frage. Wurzelatmung hat zu diesem frühen Stadium kaum Bedeutung. Rizinusschrot hat ein wesentlich höheres C/N-Verhältnis als Gelbe Lupine (Tabelle 2-1). Bei der hier vorgenommenen N-äquivalenten Düngung wurde dementsprechend ca. 23 % mehr Rizinusschrot-C als Gelbes Lupinen-C gedüngt. Dass dieser Unterschied nicht zu deutlicheren Unterschieden bei der CO₂-Entbindung aus dem Boden führte, lässt darauf schließen, dass die mikrobielle Verfügbarkeit von C aus der Gelben Lupine höher ist als die Verfügbarkeit von C aus dem Rizinusschrot.

Auch für den mineralischen N können signifikante Unterschiede fast ausschließlich zwischen den gedüngten und der nicht gedüngten Variante nachgewiesen werden (Abbildung 2-15). Bei den niedrigen Düngungsstufen sind kaum Unterschiede zwischen den Düngemitteln zu erkennen. Bei den höheren Düngungsstufen wurde jedoch tendenziell in den Variante mit Gelber Lupine mehr N mineralisiert als in den Variante mit Rizinusschrot (0-15 cm). Dies galt insbesondere für die frühen und mittleren Messtermine. Es bestätigt die Beobachtungen aus dem Inkubationsversuch, wonach insbesondere der N des Gelben Lupinenschrots auch bei den anfänglich noch recht niedrigen Temperaturen leicht umsetzbar ist. Die hier genannten Tendenzen sind einheitlich über alle Düngungsvarianten, was ihnen trotz fehlender Signifikanz eine gewisse Aussagekraft verleiht.

Auch für den N scheint im Feldversuch also die mikrobielle Verfügbarkeit bei Gelber Lupine höher zu sein als die Verfügbarkeit von Rizinusschrot. Im Gegensatz zum Gefäßversuch (Kapitel 2.2.1.2) wird hier bei der Brache netto mineralisierter N nicht wieder immobilisiert. Es fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den Düngungsniveaus bei Gelber Lupine stärker sind als bei Rizinusschrot.

Rechnerisch wurden maximal zwischen 40 und 125 % des Dünger N in der mineralischen Fraktion wiedergefunden (Tabelle 2-22). Die flächenbezogenen Daten für Möhren sind allerdings, wie im Abschnitt 2.2.1.2 beschrieben, mit Vorsicht zu interpretieren. Dennoch liegen auch die Werte für Brache und Radieschen immerhin bei bis zu 90 % Dünger-N.

Zu Versuche können innerhalb der Düngenniveaus keine Unterschiede im Restgehalt an mineralischem N zwischen Rizinusschrot und Gelber Lupine festgestellt werden (Abbildung 2-15, Abbildung 2-16).

Unter 15 cm sind fast keine Unterschiede im mineralischen N zwischen den Düngungsvarianten mehr festzustellen (Abbildung 2-15). Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Dünge-

mittel sauber in die oberen 15 cm des Bodens eingearbeitet wurden. Die Entscheidung, nur die oberen 15 cm auf mikrobielle Biomasse und K_2SO_4 -extrahierbaren organischen C und N zu untersuchen erscheint somit gerechtfertigt.

Lediglich Weißkohl war, trotz seiner verhältnismäßig kurzen Vegetationszeit und der höheren Aufwandmengen, in der Lage, den mineralisierten N zu einem erheblichen Anteil auszunutzen (Abbildung 2-16, Tabelle 2-22). Bei Radieschen und Möhren blieben selbst in der niedrigen Düngungsstufe (80 kg N ha^{-1}) über 70 kg N in mineralischer Form auf dem Feld zurück (Abbildung 2-16). Rechnerisch entsprach dies, rechnerisch nach Abzug des mineralischen N in der nicht gedüngten Variante, immerhin 14 bis 34 % des Dünger N (Tabelle 2-22). Bei der hohen Düngungsvariante (140 kg N ha^{-1}) verblieben über 125 kg mineralischer N, entsprechend 31 bis 58 % Dünger-N. Selbst in der ungedüngten Variante sind dies bei Radieschen immerhin noch etwa 70 kg N. Beim Vergleich mit der Brache fällt auf, dass Radieschen nur etwa die Hälfte des Bodenbürtigen mineralischen N ausnutzten.

Beim mikrobiellen Biomasse-C und -N (Abbildung 2-14) zeichnete sich ein ähnliches Bild wie beim mineralischen N ab. Auch hier gab es tendenzielle Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten, die sich in Einzelfällen signifikant von der ungedüngten Variante unterschieden. Meist lag die mikrobielle Biomasse nach Düngung mit Gelber Lupine höher als nach Düngung mit Rizinusschrot. Bei Gelber Lupine waren die Unterschiede zwischen den Aufwandmengen wesentlich deutlicher ausgeprägt als bei Rizinusschrot. Am deutlichsten hob sich die hohe Düngungsvariante mit Gelber Lupine von den anderen Varianten ab. Rechnerisch waren hier zwischenzeitlich fast 40% des Dünger-C und über 50% des Dünger-N in der mikrobiellen Biomasse gebunden (Tabelle 2-21, Tabelle 2-22). Diese Beobachtungen basierten selten auf signifikanten Unterschieden, waren aber einheitlich über alle Versuche, was ihnen trotzdem eine gewisse Aussagekraft verleiht.

Abnahmen des mikrobiellen Biomasse-N waren nicht immer mit parallelen Zunahmen des mineralischen N korreliert. Ferner gab es auch Phasen starker netto N-Mineralisation die nicht mit Abnahmen des mikrobiellen Biomasse einher gingen. Dies stützt die oben bereits aufgestellte These, dass, die mikrobielle Biomasse als solche nicht die alleinige Quelle und Senke für Mineralisation und Immobilisation von N im Boden ist. Die mikrobielle Biomasse ist nach der Zufuhr von hoch verfügbarem organischem N vielmehr als eine Durchgangsgröße mit hoher Umsatzrate anzusehen. Als Zwischenspeicher kommen außerdem mikrobielle Residualprodukte in Frage.

Die Gemessenen Mengen an K_2SO_4 -löslichem organischen C und N waren, mit Ausnahme von zwei Probenahmen im Möhrenversuch, vergleichsweise gering (Abbildung 2-14, Abbildung 2-15). Dennoch konnten signifikante Unterschiede zwischen den gedüngten Varianten und der ungedüngten Variante nachgewiesen werden.

Rechnerisch waren zwischenzeitlich zwischen 62 % bis weit über 100 % des Dünger-N in den gemessenen Bodenfraktionen enthalten (Tabelle 2-22). Die besonders hohen Werte im Möhren-Versuch müssen allerdings mit Vorsicht behandelt werden (siehe oben). Dennoch bestätigen die über 100 % liegenden Werte bei Brache und Radieschen den bereits im Inkubationsversuch beobachteten Priming-Effekt. Auch hier war der Priming-Effekt bei Leguminosenkörnerschrot deutlicher ausgeprägt als bei Rizinusschrot. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte nicht geklärt werden, welchen Einfluss das Hacken der Gemüsekulturen auf die Steigerung der mikrobiellen Umsatzaktivität im Feldversuch hatte.

Am Versuchende wurden rechnerisch zwischen 87 und 125 % des Dünger N in der Brachevariante wiedergefunden (Summe N in Tabelle 2-22). Es kann also davon ausgegangen werden, dass praktisch der gesamte Dünger-N mikrobiell umgesetzt wurde. Im Gegensatz zur Brachevariante lag die Summe N (Boden + Spross) für Radieschen und Möhren jedoch nur zwischen 39 und 70 % des Dünger N. Offensichtlich liegt hier also ein erheblicher Einfluss der Pflanzen oder genauer genommen der Wurzeln vor. Ein erheblicher Teil des Dünger-N wurde sicher in die Wurzeln eingelagert oder von diesen als Rhizodeposition wieder ausgeschieden und lag nach der Ernte noch als Wurzelrest oder als Rhizodepositate vor. Ferner ist denkbar, dass ein Teil des N von der Rhizosphären-Mikroflora immobilisiert wurde und nach der Ernte in Form mikrobieller Residualprodukte vorlag. Geht man dennoch davon aus, dass die Rest N-Fraktion bei Radieschen und Kohl in Tabelle 2-22 im wesentlichen aus Wurzelresten und Rhizodepositaten besteht, dann wird deutlich, dass netto 40 bis 80 % des durch die Pflanzen aufgenommenen N über die Wurzeln wieder in den Boden zurück geflossen sein können ($= \text{Rest N} / (\text{Spross N} + \text{Rest N}) * 100$).

Selbst bei Weißkohl verblieb am Versuchsende trotz guter Ausnutzung des zur Verfügung stehenden mineralischen N etwa die Hälfte des Dünger-N auf dem Acker (Summe N Boden + Rest N Boden in Tabelle 2-22). Bei Radieschen waren dies sogar ca. 80 %. Da es sich hierbei wie oben beschrieben neben mineralischem N vermutlich im wesentlichen um Wurzelreste und Rhizodepositate sowie Mikroorganismen und deren Residualprodukte, also um relativ leicht umsetzbare Fraktionen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass ein erheblicher Anteil davon noch im selben Jahr mineralisiert wird. Die dabei mineralisierten Nährstoffe stünden dann einer Zweitkultur oder Zwischenfrucht zur Verfügung. Anderenfalls sind diese Nährstoffe, vor allem N, hochgradig auswaschungsgefährdet.

Zusammenfassen kann also gefolgert werden, dass bei der Düngung von Gemüsekulturen mit leicht umsetzbaren vegetabilen Düngemitteln, die gesamte gedüngte N-Menge im Verlauf der Vegetationszeit als pflanzenverfügbar N zur Verfügung steht. Es kommt dabei zu einer erheblichen Steigerung der mikrobiellen Aktivität im Boden. Dies kann zu einem messbaren Primingeffekt führen, also zum Umsatz von zusätzlichem C, N und anderen Nährstoffen aus dem Hu-

musvorrat des Bodens. Dieser Effekt ist kurzfristig als positiv für die Nährstoffversorgung der angebauten Gemüsekulturen zu werten. Bei einem regelmäßigem Einsatz von vegetabilen Düngemitteln könnte dies jedoch langfristig zu einem Humusschwund führen, wenn innerhalb der Fruchtfolge keine entsprechenden Ausgleichsmaßnahmen durchgeführt werden. Weitere Untersuchungen sind erforderlich um diese Hypothese zu überprüfen.

Sowohl bei den pflanzlichen N-Erträgen als auch bei den gemessenen N-Fraktionen im Boden zeichnete sich in der hier untersuchten Frühjahrperiode für das Körnerschrot der Gelben Lupine mindestens eine ähnliche N-Verfügbarkeit ab wie für das Rizinusschrot. Besonders am Anfang waren sehr niedrige Temperaturen vorherrschend, womit sich eine Übereinstimmung mit den Befunden aus den Inkubationsversuchen ergibt. Im weiteren Verlauf der Versuche muss die Witterung, insbesondere bei den länger andauernden Feldversuchen mit Weißkohl und Möhren, jedoch als überdurchschnittlich warm eingeschätzt werden. Dies hätte, entsprechen den Erwartungen aus den Inkubationsversuchen, zu einer höheren N-Verfügbarkeit des Rizinusschrots führen müssen. Gleichzeitig war diese Periode aber auch ausgesprochen trocken. Trockenheit hat auf den mikrobiellen Umsatz im Boden ähnliche Auswirkungen wie besonders niedrige Temperaturen. Möglicherweise können die oben beschriebenen Effekte niedriger Temperaturen auf den Umsatz N-reicher und N-armer Stoffgruppen auch auf Perioden überdurchschnittlicher Trockenheit übertragen werden. Damit könnte das hinsichtlich der N-Verfügbarkeit besonders günstige Abschneiden des Körnerschrots der Gelben Lupine im Feldversuch sowohl für die sehr kalte wie auch für die warme aber sehr trockene Periode erklärt werden. Weiter Untersuchungen zur Prüfung dieser Hypothese sind allerdings noch erforderlich.

Tabelle 2-14: Zeitplan der Feldversuche.

B = Entnahme von Bodenproben, R = Messung der CO₂-Entbindung aus dem Boden, D = Düngung, A = Aussaat bzw. Auspflanzung, E = Ernte. Brache und Radieschen sind wegen unbedeutendem Pflanzenwachstum bis zum 24.04.2003 identisch, d.h. es erfolgte nur eine Probenahme.

Datum	Brache	Radieschen	Weißkohl	Möhre
24.03.2003	B	B	B	B
26.03.2003	D	D		D
31.03.2003	R	R		R
03.04.2003			D	
08.04.2003		A		
09.04.2003	B, R	B, R		
11.04.2003			A	
14.04.2003			B, R	
23.04.2003	B, R	B, R		
24.04.2003				A
28.04.2003				B, R
05.05.2003			B, R	
19.05.2003		B, R		
20.05.2003		E		
26.05.2003	B, R			
02.06.2003				B, R
16.06.2003			B, R	
17.06.2003			E	
30.06.2003				B, R
28.07.2003				B, R
31.07.2003				E

Tabelle 2-15: C- und N-Gehalte sowie Gehalte der van Soest Fraktionen Cellulose, Hemizellulose und Lignin der in den Feldversuchen eingesetzten Düngemittel.

Die Fraktionen „Cellulose“, „Hemizellulose“ und „Lignin“ charakterisieren vor allem die unterschiedliche Löslichkeit in Säuren. Sie stellen nicht unbedingt einheitliche chemische Stoffgruppen dar. TM = Trockenmasse

Dünger	C _t [% TM]	N _t [%TM]	C _t /N _t	van Soest Analyse*		
				Lignin [%TM]	Hemizellulose [%TM]	Zellulose [%TM]
Ackerbohne (Körnerschrot)	43,8	4,6	9,6	1,7	18,2	11,3
Gelbe Lupine (Körnerschrot)	45,3	6,6	6,9	1,6	3,9	16,2
Phytoperls (Granulat)	41,3	8,0	5,2	31,1	20,7	1,2
Rhizinusschrot	48,2	5,7	8,5	31,3	9,7	9,1

*Daten vom Gefäßversuch (s.o.) übernommen

Tabelle 2-16: Monatliche Wetterdaten für den Zeitraum der Feldversuche (Wetterstation Ultraleichtflugschule Calden (Liedmann, 2003)) sowie minimale und maximale Bodentemperaturen in 3 cm Tiefe während den Messungen der CO₂-Entbindung aus dem Boden und der Entnahme der Bodenproben am frühen Vormittag (jeweils zwischen 5:00 Uhr und 10:00 Uhr).

Monat	Lufttemperatur			Luftfeuchtigkeit Mittel [%]	Niederschlag Summe [mm]
	Minimum [° C]	Mittel [° C]	Maximum [° C]		
März 2003	-5,5	5,8	20,2	72	44
April 2003	-9,4	8,6	23,5	65	50
Mai 2003	2,8	14,7	32,1	75	39
Juni 2003	6,0	19,6	33,5	71	58
Juli 2003	8,5	20,1	36,7	54	48
	Bodentemperatur während der CO ₂ -Messungen				
Brache/ Radieschen	2,0		13,4		
Möhren	8,9		15,7		
Weißkohl	0,0		15,7		

Tabelle 2-17: Auswirkung der Applikation vegetabiler Dünger auf den Gesamt-Frischmasse-Ertrag von Radieschen [dt/ha] im Feldversuch

Düngung [kg N/ha]	0	80	140
Kontrolle	383,2 b		
Rizinusschrot		519,4 ab	569,9 a
Lupinenschrot		499,4 ab	528,4 a
Ackerbohnschrot		459,5 ab	493,9 ab
Phytoperls		490,2 ab	559,8 a

Tabelle 2-18: Auswirkung der Applikation vegetabiler Dünger auf den N-Ertrag von Radieschen [kg N/ha] im Feldversuch

Düngung [kg N/ha]	0	80	140
Kontrolle	66,2		
Rizinusschrot		78,8	87,6
Lupinenschrot		83,1	88,4
Ackerbohnschrot		71,5	78,8
Phytoperls		72,8	80,9

Tabelle 2-19: Auswirkung der Applikation vegetabiler Dünger auf den Nitrat-Gehalt von Radieschen-Knollen [mg NO₃/kg Frischmasse] im Feldversuch.

Düngung [kg N/ha]	0	80	140
Kontrolle	20,2		
Rizinusschrot		28,7	58,1
Lupinenschrot		28,8	38,4
Ackerbohnschrot		28,9	27,4
Phytoperls		24,0	23,3

Tabelle 2-20: F-Tabelle (ANOVA mit repeated measures) für den Faktor Zeit bei den Feldversuchen.

*** = Signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Messterminen ($P \leq 0.001$).

Messgröße	Brache	Radieschen	Möhre
CO₂-Entbindungsrate	1,3n.s.	1,3n.s.	0,8n.s.
mineralischer N	5 ***	135 ***	95 ***
mikrobieller Biomasse-C	29 ***	42 ***	21 ***
mikrobieller Biomasse-N	94 ***	87 ***	78 ***
K₂SO₄-extrahierbarer organischer C	23 ***	18 ***	12 ***
K₂SO₄-extrahierbarer organischer N	37 ***	137 ***	22 ***

Tabelle 2-21: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen C-Pools bei den Feldversuchen.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-C.

	mikrobieller Biomasse-C		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer C	
	Maximalwerte [% Dünger-C]	Versuchsende [% Dünger-C]	Maximalwerte [% Dünger-C]	Versuchsende [% Dünger-C]
Brache				
Rizinusschrot 80 kg N/ha	6,9	4,9	4,2	1,7
Rizinusschrot 140 kg N/ha	9,4	-2,6	2,2	1,2
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	21,0	3,2	4,2	4,2
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	37,3	4,7	4,8	1,8
Radieschen				
Rizinusschrot 80 kg N/ha	10,5	10,5	4,2	0,9
Rizinusschrot 140 kg N/ha	9,4	5,8	2,2	1,2
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	21,0	10,7	3,8	1,0
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	37,3	12,8	4,8	0,9
Möhren				
Rizinusschrot 80 kg N/ha	20,2	7,8	54,8	1,1
Rizinusschrot 140 kg N/ha	11,5	-0,4	31,5	4,6
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	21,3	14,3	54,4	-1,0
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	26,6	8,3	31,0	8,2
Kohl				
Rizinusschrot 120 kg N/ha	9,5	9,5	3,3	2,5
Rizinusschrot 240 kg N/ha	9,1	4,7	2,2	0,9
Gelbe Lupine 120 kg N/ha	13,5	7,3	6,9	0,2
Gelbe Lupine 240 kg N/ha	19,1	10,7	4,1	2,5

Tabelle 2-22: Mittelwerte, Maxima und Schlusswerte der gemessenen N-Pools bei den Gefäßversuchen.

Angaben in % des zugegebenen Dünger-N. n.g. = nicht gemessen. Fortsetzung nächste Seite.

	mineralischer N (0-15 cm)		mikrobieller Biomasse-N		K ₂ SO ₄ -extrahierbarer organischer N	
	Maximalwerte	Versuchsende	Maximalwerte	Versuchsende	Maximalwerte	Versuchsende
	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]
Brache						
Rizinusschrot 80 kg N/ha	89,7	77,5	7,6	-0,5	28,2	28,2
Rizinusschrot 140 kg N/ha	58,3	54,1	15,3	5,5	27,2	27,2
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	79,4	79,4	24,2	8,5	37,5	37,5
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	83,5	83,5	51,1	1,7	31,0	31,0
Radieschen						
Rizinusschrot 80 kg N/ha	89,7	14,4	7,6	7,3	2,3	2,3
Rizinusschrot 140 kg N/ha	58,3	43,2	15,3	6,6	5,0	5,0
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	70,4	24,1	24,2	11,5	1,6	1,6
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	77,5	31,0	51,1	15,7	4,3	4,3
Möhren						
Rizinusschrot 80 kg N/ha	124,6	34,0	25,1	3,0	54,8	1,1
Rizinusschrot 140 kg N/ha	87,7	43,6	12,6	-1,6	31,5	4,6
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	67,5	23,9	16,8	11,6	54,4	-1,0
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	114,3	58,4	21,1	12,4	31,0	8,2
Kohl						
Rizinusschrot 120 kg N/ha	45,2	7,5	15,1	15,1	12,2	2,8
Rizinusschrot 240 kg N/ha	48,6	2,4	15,6	6,7	9,0	1,5
Gelbe Lupine 120 kg N/ha	40,1	5,4	14,8	9,2	15,1	1,0
Gelbe Lupine 240 kg N/ha	67,7	6,4	24,3	11,0	6,3	2,1

Fortsetzung Tabelle 2-22

	Summe N (Boden)		Spross-N	Summe N (Boden + Spross)	Rest N Boden
	Maximalwerte	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende
	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]	[% Dünger-N]
Brache					
Rizinusschrot 80 kg N/ha	105,2	105,2	0,0	105,2	-5,2
Rizinusschrot 140 kg N/ha	86,7	86,7	0,0	86,7	13,3
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	125,4	125,4	0,0	125,4	-25,4
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	127,1	116,2	0,0	116,2	-16,2
Radieschen					
Rizinusschrot 80 kg N/ha	88,4	24,0	15,7	39,8	60,2
Rizinusschrot 140 kg N/ha	69,9	54,8	15,3	70,0	30,0
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	80,3	37,3	21,2	58,4	41,6
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	127,1	51,0	15,8	66,8	33,2
Möhren					
Rizinusschrot 80 kg N/ha	148,9	38,1	n.g.	n.g.	n.g.
Rizinusschrot 140 kg N/ha	115,6	46,6	n.g.	n.g.	n.g.
Gelbe Lupine 80 kg N/ha	126,3	34,5	n.g.	n.g.	n.g.
Gelbe Lupine 140 kg N/ha	144,3	79,1	n.g.	n.g.	n.g.
Kohl					
Rizinusschrot 120 kg N/ha	61,9	25,4	43,4	68,8	31,2
Rizinusschrot 240 kg N/ha	66,2	10,6	41,1	51,6	48,4
Gelbe Lupine 120 kg N/ha	65,1	15,7	50,8	66,4	33,6
Gelbe Lupine 240 kg N/ha	87,4	19,5	42,6	62,1	37,9

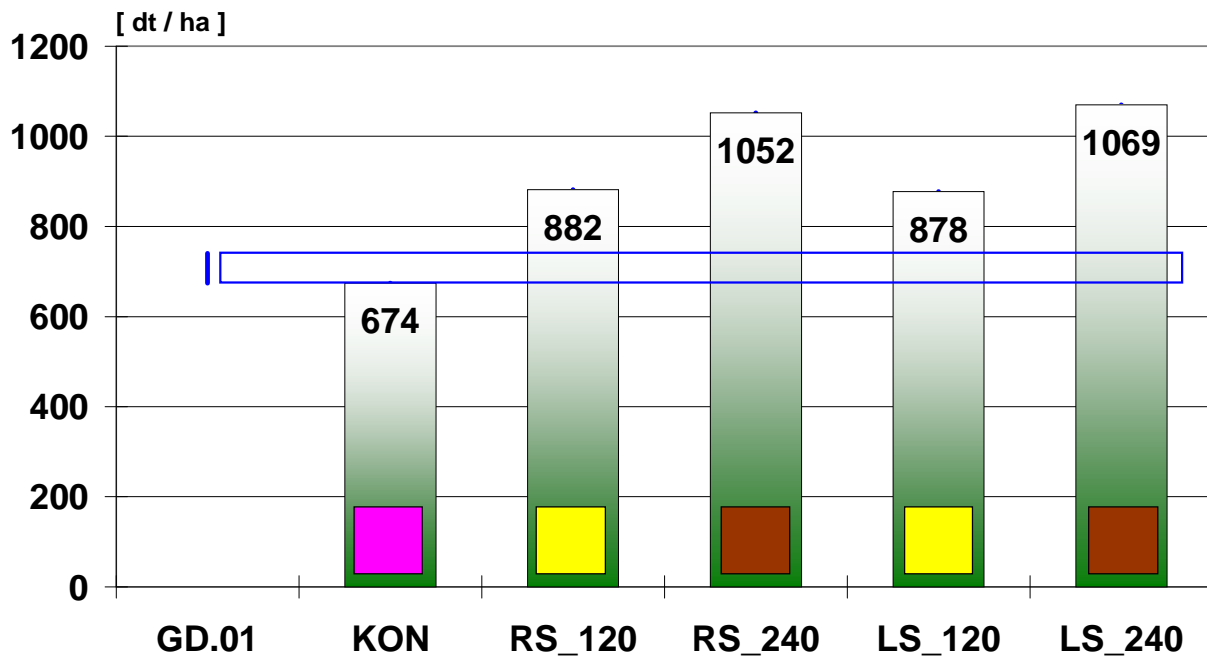


Abbildung 2-8: Einfluss vegetabler Dünger auf den Rothertrag von Weißkohl.

(GD.01: Grenzdifferenz (Tukey, $P \leq 0,01$), KON: ungedüngt, RS: Rizinussschrot; LS: Lupinenschrot; _120: 120 kg N ha⁻¹; _240: 240 kg N ha⁻¹)

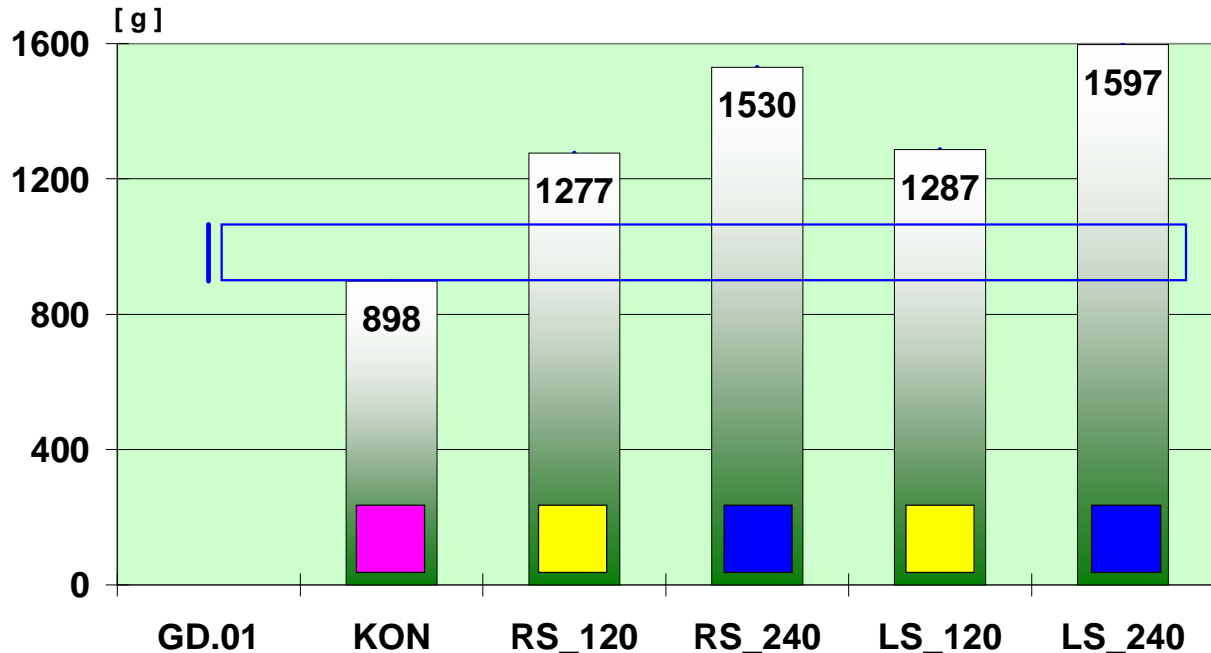


Abbildung 2-9: Einfluss vegetabler Dünger auf das Einzelkopf-Gewicht von Weißkohl.

(GD.01: Grenzdifferenz (Tukey, $P \leq 0,01$), KON: ungedüngt, RS: Rizinussschrot; LS: Lupinenschrot; _120: 120 kg N ha⁻¹; _240: 240 kg N ha⁻¹)

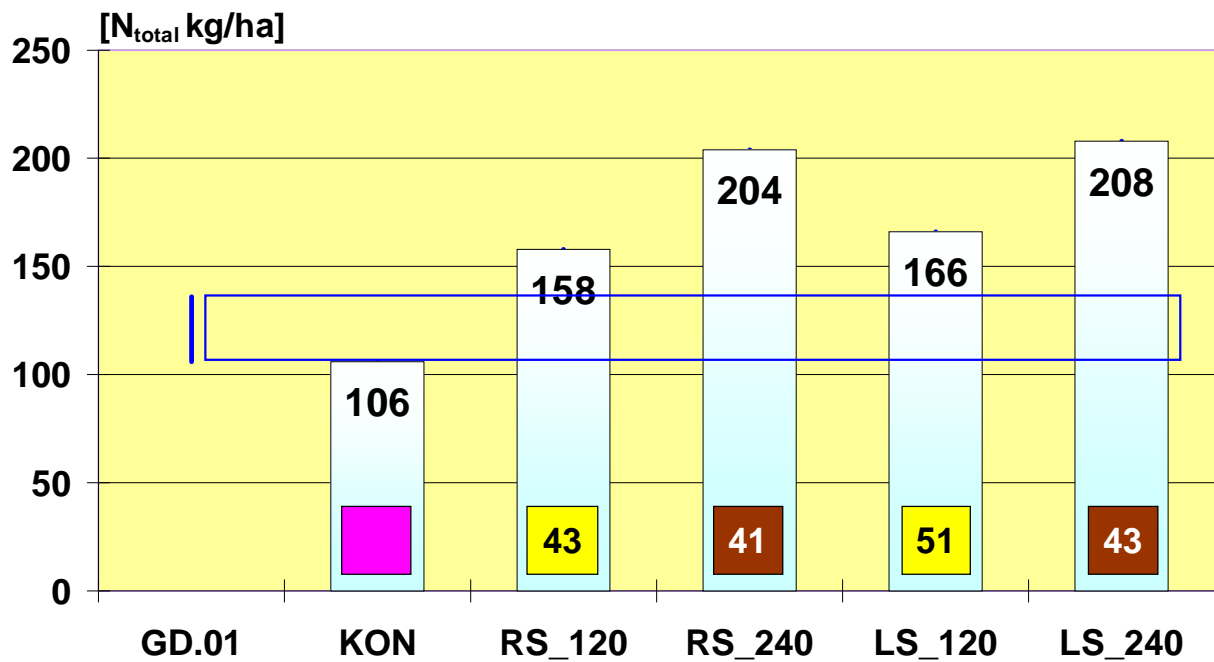


Abbildung 2-10: Einfluss vegetabiler Dünger auf den N-Ertrag von Weißkohl.

(GD.01: Grenzdifferenz (Tukey, $P \leq 0,01$), KON: ungedüngt, RS: Rizinusschrot; LS: Lupinenschrot; _120: 120 kg N ha⁻¹; _240: 240 kg N ha⁻¹) {Werte in Balken = % Dünger-N}

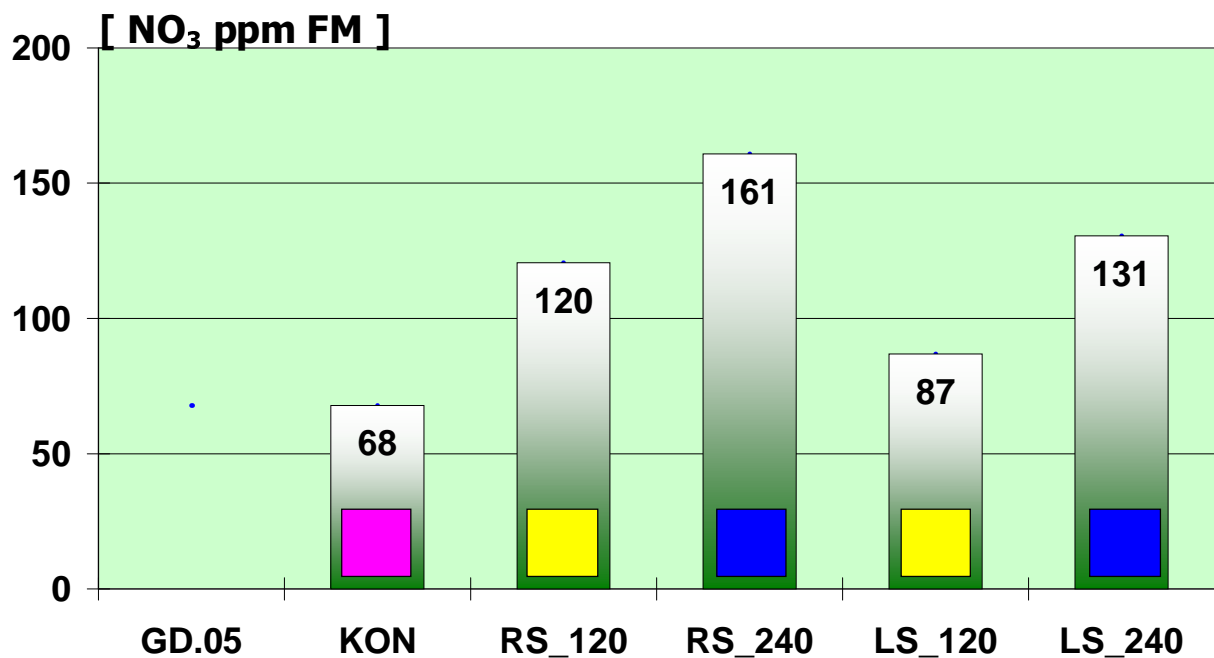


Abbildung 2-11: Einfluss vegetabiler Düngemittel auf den NO₃-Gehalt von Weißkohl.

(GD.05: Grenzdifferenz (Tukey, $P \leq 0,05$, keine Signifikanzen), KON: ungedüngt, RS: Rizinusschrot; LS: Lupinenschrot; _120: 120 kg N ha⁻¹; _240: 240 kg N ha⁻¹)

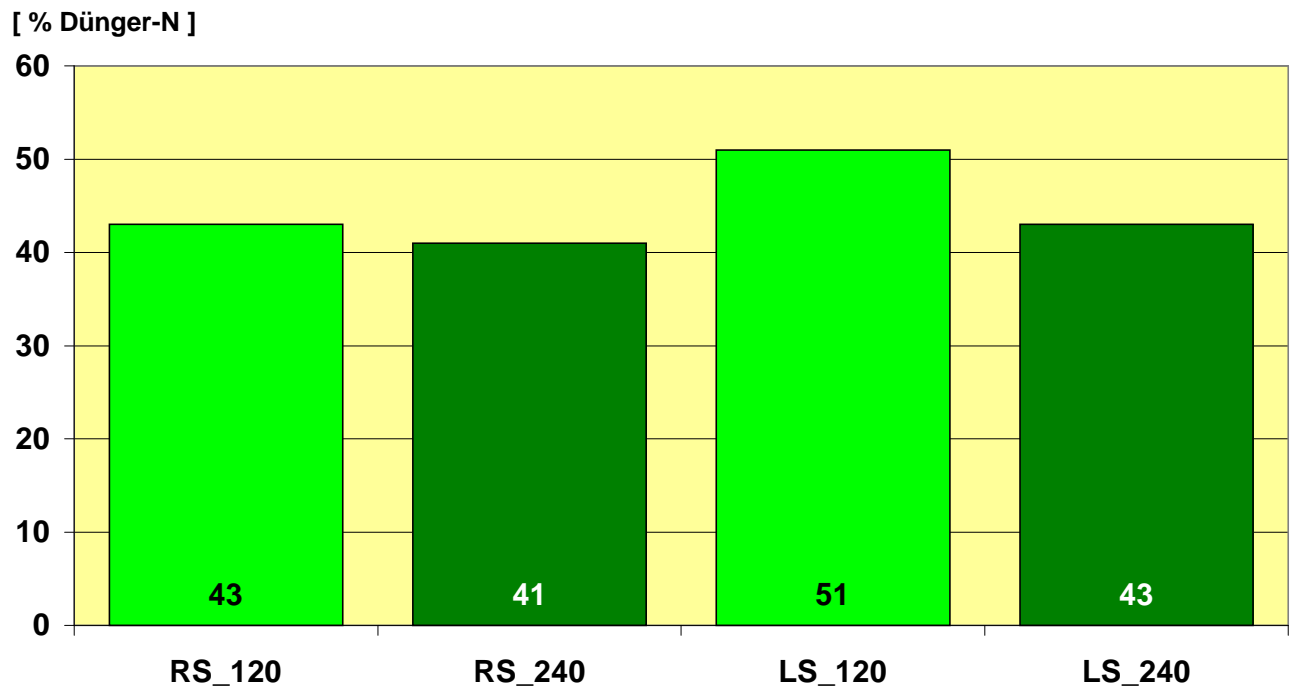


Abbildung 2-12: N-Effizienz vegetabler Dünger bei Kopfkohl im Feldversuch
 (RS: Rizinusschrot; LS: Lupinenschrot; _120: 120 kg N ha⁻¹; _240: 240 kg N ha⁻¹)

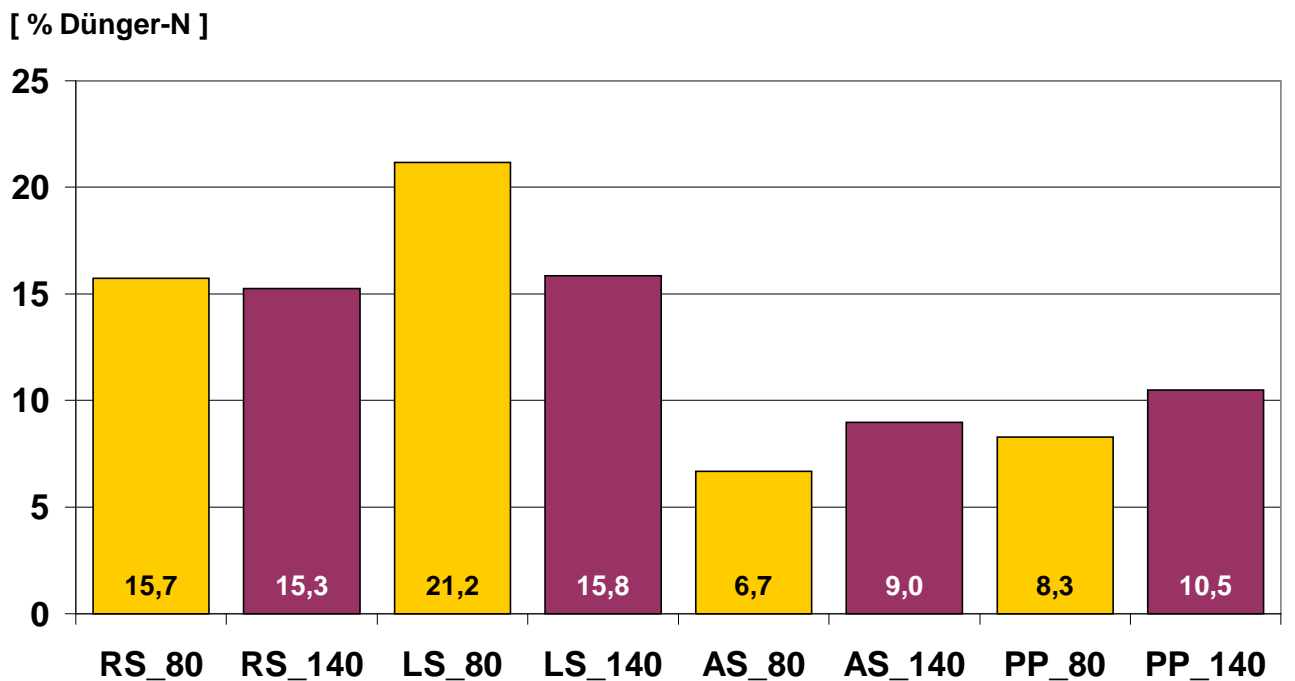


Abbildung 2-13: N-Effizienz der vegetabilen Dünger bei Radieschen im Feldversuch
 (RS: Rizinusschrot; LS: Lupinenschrot; AS: Ackerbohnschrot; PP: Phytoperls;
 _80: 80 kg N ha⁻¹; _140: 140 kg N ha⁻¹)

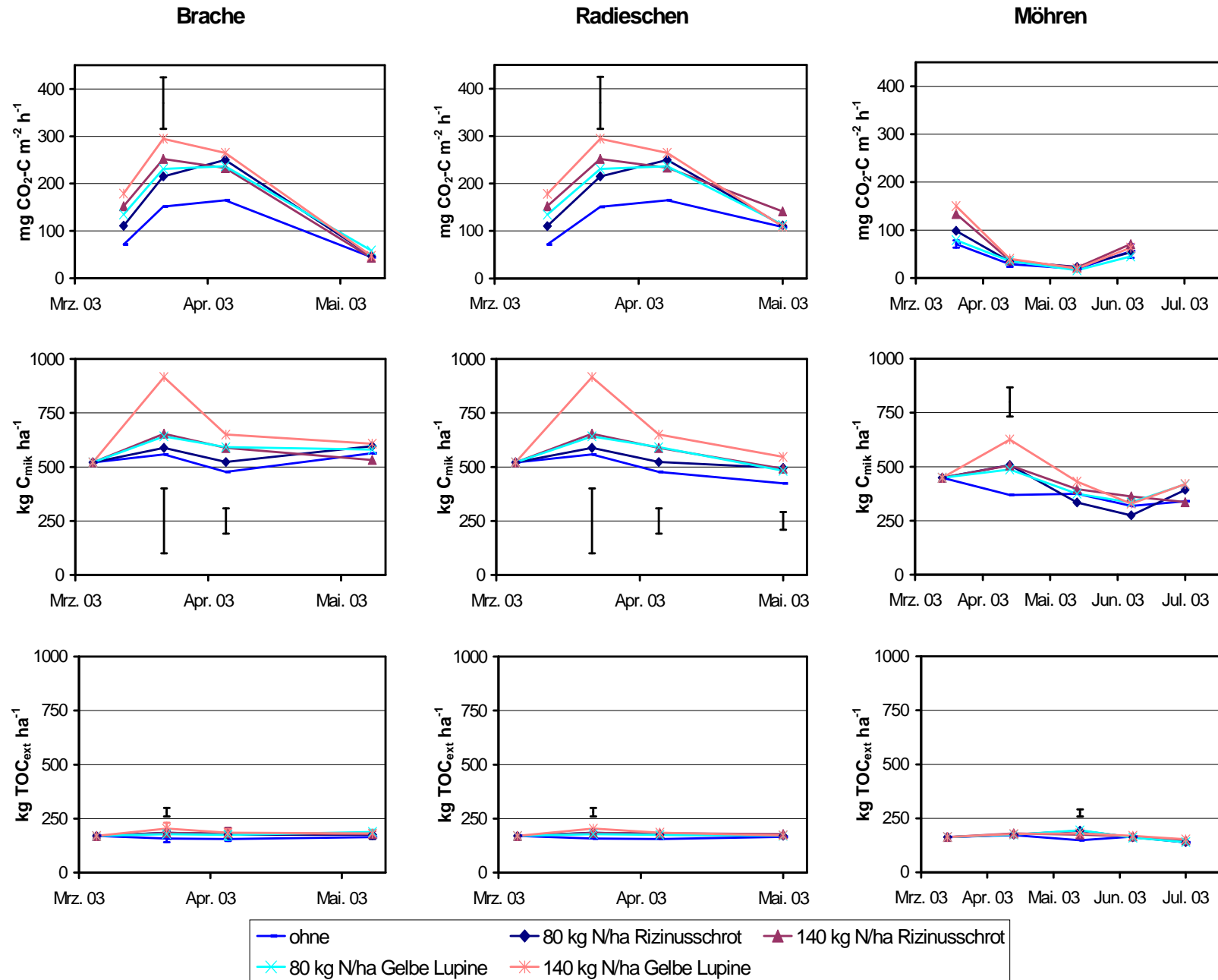


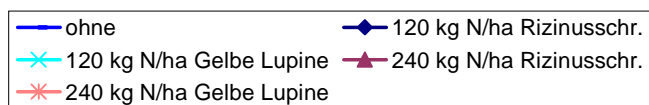
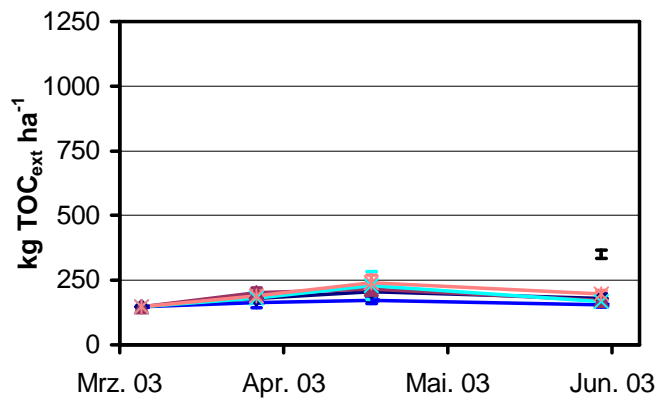
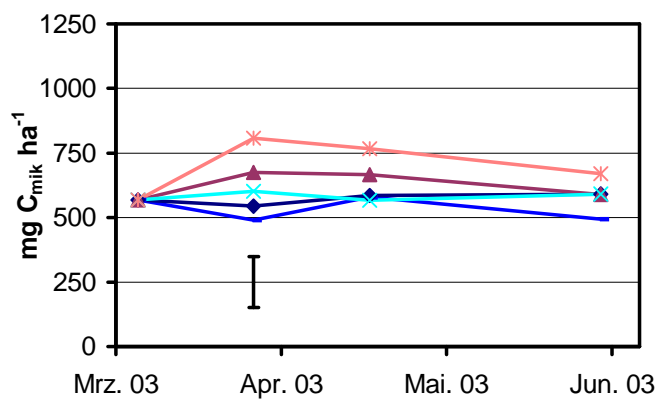
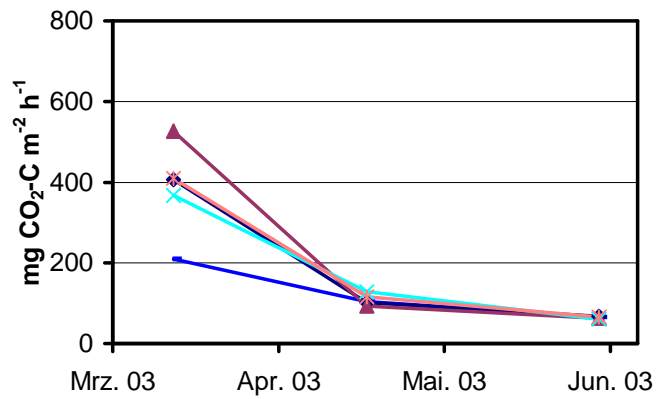
Abbildung 2-14: Zeitverläufe der Rate der CO₂-Entbindung aus dem Boden, des mikrobiellen Biomasse C (C_{mik}) und des K₂SO₄-extrahierbaren organischen C (TOC_{ext}) im Boden bei den Feldversuchen.

Die Balken zeigen die Honestly Significant Difference (Tukey, P ≤ 0,05) zwischen den Düngervarianten sofern signifikante Unterschiede vorlagen.

Fortsetzung nächste Seite.

Fortsetzung Abbildung 2-14

Weißkohl



Fortsetzung Abbildung 2-15

Weißkohl

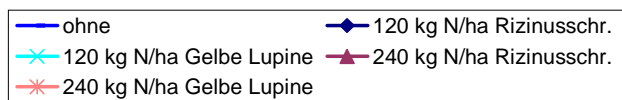
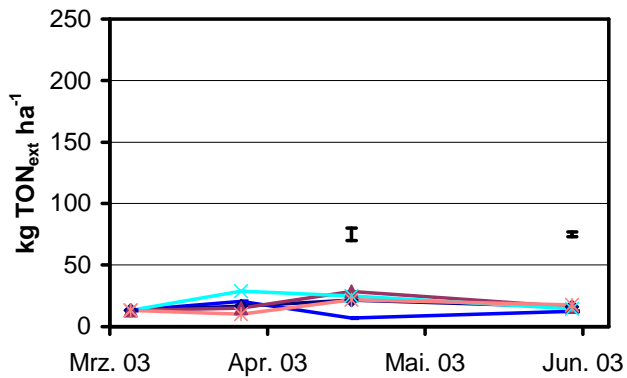
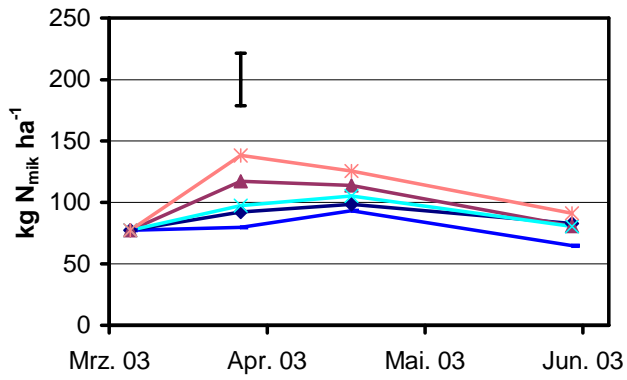
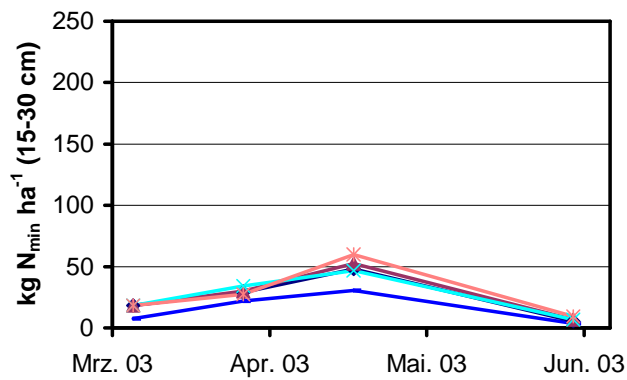
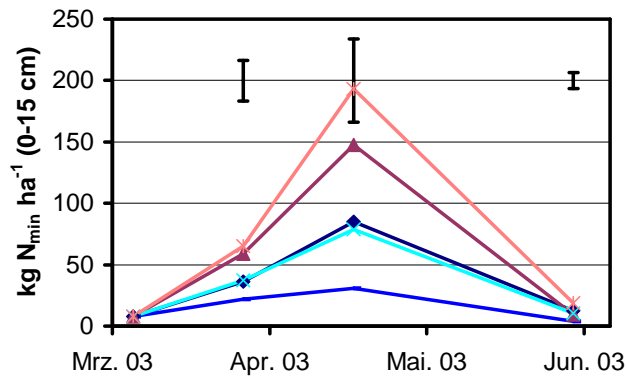
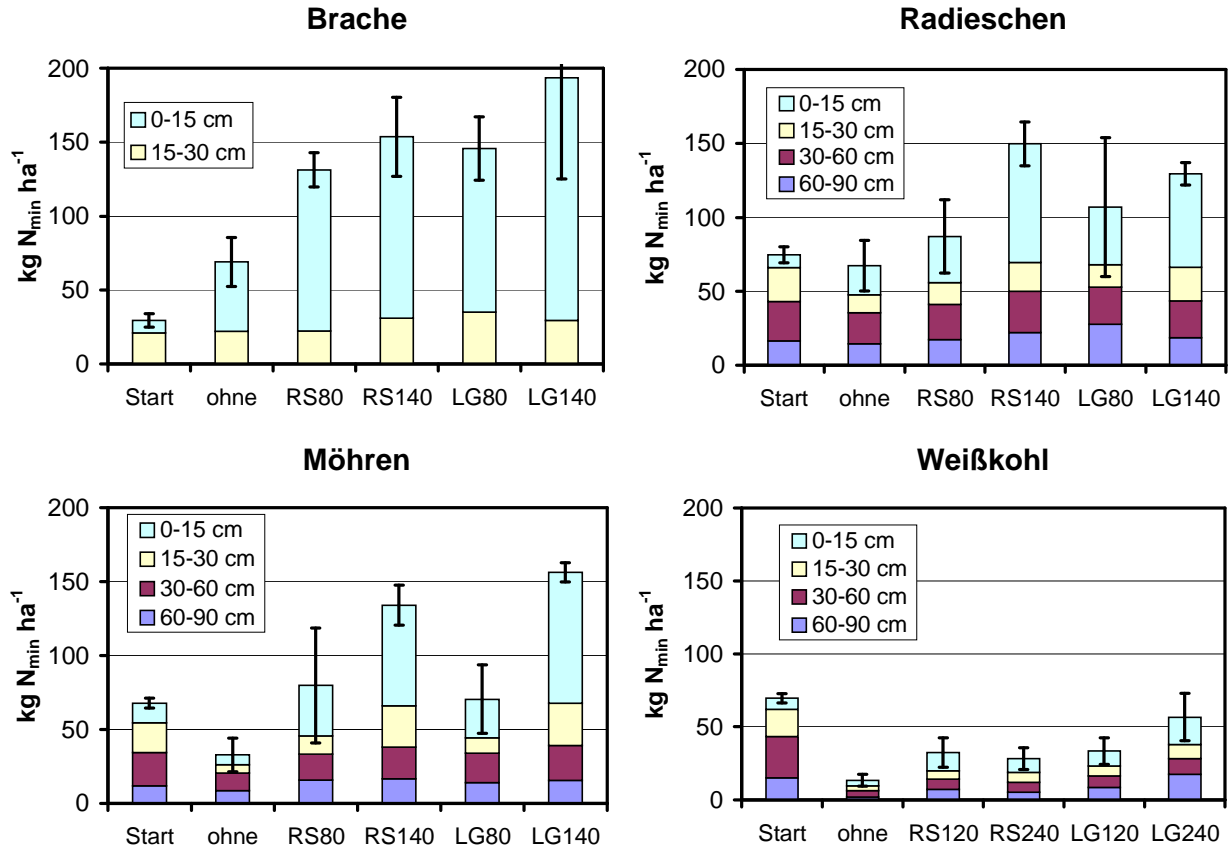


Abbildung 2-16: Mineralischer N zu Beginn (Start) und am Ende der Feldversuche

(LG = Gelbe Lupine, RS = Rizinusschrot, die nachgestellte Zahl gibt das Düngungsniveau in $\text{kg N ha}^{-1} \text{ an}$). Die Balken zeigen das 95% Konfidenzintervall für das gesamte Tiefenprofil an.



2.4 Schlussfolgerungen für den ökologischen Landbau und Vorschläge für Maßnahmen durch das BMVEL

Zusammenfassend können für den ökologischen Landbau folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Hornmehl, getestet in Inkubationsversuchen und einem Gefäßversuch, erwies sich bei mittleren Temperaturen als Dünger mit höchster Wirksamkeit.
2. Rizinusschrot, Referenz-Dünger bei allen Versuchen, wird in seiner N-Düngewirkung vom Körnerschrot der Gelbe Lupine nahezu erreicht, mit unter sogar übertroffen.
3. Insbesondere im zeitigen Frühjahr mit seinen niedrigen Temperaturen ist die Düngewirkung des Körnerschrots der Gelben Lupine gleich wie oder höher als die Düngewirkung der anderen vegetabilen Düngemittel. Selbst im Vergleich zu Hornmehl ist bei niedrigen Temperaturen mit einer ähnliche Netto-N-Mineralisation zu rechnen. Körnerschrot der Gelben Lupine kann daher für einen frühen Einsatz besonders empfohlen werden.
4. Von den vegetabilen Düngemittel kommen also Lupinen-Körnerschrote, insbesondere die der Gelben Lupine, als Alternative zu importiertem Rizinusschrot und den bislang gebräuchlichen Düngemitteln tierischer Herkunft, wie z.B. des Hornmehls, in Frage.
5. Zur Minimierung von Nitratgehalten in Feldgemüse kann ebenfalls Körnerschrot der Gelben Lupine statt Rizinusschrot als Düngemittel empfohlen werden.
6. Phytoperls und Ackerbohnschrot waren deutlich, in vielen Fällen signifikant, geringer in ihrer Wirkung als die übrigen getesteten Dünger. Dennoch dürften Ackerbohnen potentiell eine sehr geeignete Kultur für hofeigene Samendünger-Produktion darstellen, angesichts ihres weit verbreiteten Anbaus. Die geringere Wirksamkeit lässt eine entsprechend höhere Dosierung empfehlenswert erscheinen. Die nach der Ernte auf dem Acker verbleibende höhere N-Menge ist allerdings in der Düngebilanz voll zu berücksichtigen um durch eventuelle spätere Auswaschung bedingte ökologischen und ökonomische Schäden zu vermeiden.
7. Leicht umsetzbare vegetabile Düngemittel können den Humusumsatz im Boden vorübergehend deutlich erhöhen (sog. Priming-Effekt). Bei regelmäßiger Anwendung vegetabiler Düngemittel sollte der Humusgehalt am Standortes deshalb beobachtet werden. Eventuellem Humusschwund sollte durch entsprechende Zufuhr humusbildender Düngemittel, vorzugsweise Mist, und durch Zwischenfruchtanbau entgegengewirkt werden.
8. Bis über 50 % des Dünger-N können nach der Ernte als mineralischer N oder in leicht umsetzbarer organischer Form auf dem Acker zurückbleiben. Dieser Dünger-N sollte durch eine Zweitkultur oder Zwischenfrucht genutzt werden. Andernfalls besteht Auswaschungsgefahr was ökologisch und ökonomisch bedenklich ist.

Folgende Maßnahmen können dem BMVEL empfohlen werden:

1. Bio-Vegetal ist von den Positivlisten der im ökologischen Landbau zugelassenen Düngemittel zu streichen.

2. Weiterer Forschungsbedarf besteht in folgenden Bereichen:

- Nähere Untersuchungen der optimalen Düngeraufwandmengen zu verschiedenen Gemüsekulturen and auf unterschiedlichen Standorten (klassische Düngungsversuche).
- Besonders vielversprechend als Düngemittel waren in diesem Projekt die Lupinenkörnerschrote. Weitere Untersuchungen verschiedener Lupinenarten und –sorten auf ihre Eignung als Düngemittel sind aber noch erforderlich. In weiteren Untersuchungen ist vor allem die Wirkung der Blauen Lupinen zu überprüfen, da sie derzeit die größte Anbaufläche aufweist.
- Lupinenkörnerschrote scheinen auch unter relativ trockenen Bedingungen hohe N-Düngewirkungen aufzuweisen. Weitere Untersuchungen sind hierzu erforderlich.
- Ein negativer Einfluss der regelmäßigen Anwendung vegetabiler Düngemittel auf die langfristige Humusbilanz des Standortes ist auf Grund der hier vorliegenden Ergebnisse möglich. Genauere Untersuchungen dazu sind jedoch erforderlich, gleiches gilt für eventuelle Ausgleichsmaßnahmen.
- Die auf dem Acker zurückbleibende Menge an Dünger-N sollte, auch um einer eventuellen Auswaschung vorzubeugen, durch Zweitkulturen oder Zwischenfrüchte genutzt werden. Die Düngewirkung in der Zweitkultur war nicht Gegenstand dieses Projekts. Für eine ökonomische und ökologische Tragfähigkeit der Düngestrategie ist eine optimale Ausnutzung der Düngewirkung auch in der Zweitkultur eine Voraussetzung. Dazu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

3 Zusammenfassung

Traditionell wurden zur Deckung des relativ hohen Nährstoffbedarfs im ökologischen Gemüseanbau u.a. leicht umsetzbare organische Abfälle tierischer Herkunft wie Horn- und Blutmehl als Dünger eingesetzt. Als Folge des BSE-Skandals und bereits voraus gegangener Kritik an dieser Praxis wurden Düngemittel tierischer Herkunft mit Ausnahme von Hornprodukten aus den Richtlinien der Anbauverbände für Ökologischen Landbau gestrichen. Eine Strategie zum Ausgleich der dadurch entstandenen Nährstoffengpässe ist der Einsatz leicht umsetzbarer organischer Düngemittel pflanzlicher Herkunft (vegetabile Düngemittel). In Frage kommen hier neben verschiedenen bereits kommerziell angebotenen Düngemitteln vor allem Körnerleguminenschrote.

In diesem Projekt sollten folgende Fragen beantwortet werden: (1) Welchen Beitrag liefern vegetabile Düngemittel für die Stickstoff-Versorgung im ökologischen Gemüseanbau? (2) Welche Düngemittel sind besonders erfolgversprechend? (3) Welches sind die zu Grunde liegenden mikrobiellen Prozesse des Umsatzes im Boden und wie können diese gesteuert werden? (4) Wie viel des zugeführten Stickstoffs liegt nach Ende der Vegetationsperiode noch mineralisch oder organisch vor und ist somit potentiell auswaschungsgefährdet. Dabei sollte durch einen sukzessiven Übergang von Laborversuchen, über Gefäßversuche bis hin zu Feldversuchen die praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse sicher gestellt werden.

Folgende Düngemittel wurden untersucht: (1) In Laborversuchen (Inkubationsversuche bei verschiedenen Temperaturen) Ackerbohnschrot, Schrot der Gelben und der Weißen Lupine, Bio-Vegetal und Phytoperls sowie Rizinusschrot (gebräuchlicher Importdünger) und Hornmehl als Referenzdünger; (2) in Gefäßversuchen Ackerbohnschrot, Schrot der Gelben Lupine und Phytoperls sowie Rizinusschrot und Hornmehl als Referenzdünger; (3) in Feldversuchen Ackerbohnschrot, Schrot der Gelben Lupine und Phytoperls sowie Rizinusschrot als Referenzdünger. In den Feldversuchen und teilweise auch in den Gefäßversuchen wurde mit zwei Aufwandmengen gearbeitet. Die untersuchten Kulturen im Gefäß- und Feldversuch waren Radieschen, Möhre und Weißkohl (nur Feldversuch).

Bio-Vegetal ist wegen seines extrem niedrigen C/N-Verhältnisses (über 95 % Harnstoff) und seiner sehr schnellen N-Mineralisation nicht als geeignetes organisches Düngemittel im Sinne der Richtlinien einzustufen.

Hornmehl, getestet in Inkubationsversuchen und einem Gefäßversuch, erwies sich bei mittleren Temperaturen als Dünger mit höchster Wirksamkeit. Rizinusschrot, Referenz-Dünger bei allen Versuchen, wird in seiner N-Düngewirkung vom Körnerschrot der Gelbe Lupine nahezu erreicht, mit unter sogar übertroffen. Insbesondere im zeitigen Frühjahr mit seinen niedrigen Tem-

peraturen ist die Düngewirkung des Körnerschrots der Gelben Lupine gleich wie oder höher als die Düngewirkung der anderen vegetabilen Düngemittel. Selbst im Vergleich zu Hornmehl ist bei niedrigen Temperaturen mit einer ähnliche Netto-N-Mineralisation zu rechnen.

Von den vegetabilen Düngemitteln kommen also Lupinen-Körnerschrote, insbesondere die Gelbe Lupine, als Alternative zum importierten Rizinusschrot und den früher gebräuchlichen Düngemitteln tierischer Herkunft, wie z.B. des Hornmehls, in Frage.

Zur Minimierung von Nitratgehalten in Feldgemüse kann ebenfalls Körnerschrot der Gelben Lupine als Düngemittel empfohlen werden. Phytoperls und Ackerbohnschrot waren deutlich, in vielen Fällen signifikant, geringer in ihrer Wirkung als die übrigen getesteten Dünger.

Leicht umsetzbare vegetabile Düngemittel können den Humusumsatz im Boden vorübergehend deutlich erhöhen (sog. Priming-Effekt). Bei regelmäßiger Anwendung vegetabiler Düngemittel sollte die Humusbilanz des Standortes deshalb beobachtet werden. Eventuellem Humusschwund sollte durch entsprechende Zufuhr humusbildender Düngemittel, vorzugsweise Mist, und durch Zwischenfruchtanbau entgegengewirkt werden.

Bis über 50 % des Dünger-N können nach der Ernte als mineralischer N oder in leicht umsetzbarer organischer Form auf dem Acker zurückbleiben. Dieser Dünger-N sollte durch eine Zweitkultur oder Zwischenfrucht genutzt werden. Anderenfalls besteht Auswaschungsgefahr was ökologisch und ökonomisch bedenklich ist.

In den Gefäßversuchen gab es Indizien dafür, dass Pflanzenwurzeln lösliche organische N-Verbindungen direkt aufgenommen haben oder zumindest deren Mineralisation förderten. Erhebliche Mengen des mikrobiell umgesetzten vegetabilen Dünger-N werden durch die Pflanzen aufgenommen oder von der Rhizosphärenmikroflora immobilisiert und als Wurzelreste, Rhizodeposate und mikrobielle Residualprodukte wieder an den Boden abgegeben.

4 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

4.1 Laut Arbeitsplan geplante Arbeitsschritte (Soll)

- Durchführung von zwei Inkubationsexperimenten
 - Experiment 1: Kalenderwochen 22 bis 30 (2002)
 - Experiment 2: Kalenderwochen 26 bis 34 (2002)
 - Analysen ab Kalenderwoche 35 (2002)
- Durchführung von Gefäßversuchen
 - Vorbereitung: Kalenderwochen 45 und 46 (2002)
 - Durchführung: Kalenderwochen 47 (2002) bis 8 (2003)
 - Analysen ab Kalenderwoche 9 (2003)
- Durchführung von Feldversuchen
 - Vorbereitung: Kalenderwochen 13 und 14 (2003)
 - Durchführung: Kalenderwochen 15 bis 32 (2003)
 - Analysen ab Kalenderwoche 33 (2003)
- Zeitpuffer für Analysen: Oktober/November 2003
- Veröffentlichungen Oktober/November 2002 und ab April 2003

4.2 Tatsächlich durchgeführte Arbeitsschritte (Ist)

- Durchführung von zwei Inkubationsexperimenten
 - Inkubationsexperimente abgeschlossen
 - Analysen abgeschlossen
 - Auswertung abgeschlossen
- Durchführung von Gefäßversuchen
 - Gefäßversuche abgeschlossen. Wegen starken Befalls durch die Umfallkrankheit musste der Versuch mit Radieschen wiederholt werden.
 - Analysen abgeschlossen
 - Auswertung abgeschlossen
- Durchführung von Feldversuchen
 - Feldversuche abgeschlossen
 - Analysen abgeschlossen
 - Auswertung abgeschlossen. Wegen einer technischen Panne konnte die Beerntung eines Versuchs (Möhren) nicht ausgewertet werden.
- Veröffentlichungen

- Präsentationen auf Konferenzen und Workshops
 - Workshop der "Arbeitsgruppe Ökogemüse" am 12. September 2002 in Witzenhausen: Vorstellung des Konzepts und erster Ergebnisse. Ein Abstract liegt der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau.
 - 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau 2003 vom 23. bis 26. Februar in Wien: Präsentation eines Posters mit dem Titel "Umsatz und Wirkung Vegetabler Düngemittel im Ökologischen Gemüseanbau - Konzept und erste Ergebnisse". Ein Abstract liegt der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau vor.
 - Symposium der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung am 12./13. September 2003 in Gießen: Präsentation eines Posters mit dem Titel "Umsatz und Wirkung Vegetabler Düngemittel im Ökologischen Gemüseanbau - Gefäßversuche". Ein Abstract liegt der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau vor.
 - Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft vom 30. August - 07. September in Frankfurt/Oder: Präsentation eines Vortrags mit dem Titel: Einfluss der Temperatur auf den Umsatz von Pflanzenresiduen mit engem C/N-Verhältnis. Ein Abstract liegt der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau vor.
 - Beratertreffen Ökologischer Gemüsebau in Grünberg, Thema: Vegetabile Dünger - eine Alternative zu sonstigen organischen Handelsdüngern im Ökologischen Gemüsebau?
- Veröffentlichte Artikel
 - Müller T. und von Fragstein P. (2003): Umsatz und Wirkung vegetabler Düngemittel im ökologischen Gemüsebau - Konzept und erste Ergebnisse. In: Freyer B.: Ökologischer Landbau der Zukunft, Universität für Bodenkultur Wien, Austria, S. 597-598.
 - Müller T. and von Fragstein P. (2003): Umsatz und Wirkung vegetabler Düngemittel im ökologischen Gemüsebau - Inkubations- und Gefäßversuche. In: Festkolloquium 200 Jahre Justus Liebig - Kurzfassung der Posterbeiträge, Justus Liebig Universität Gießen, Germany, S. 39.
 - Müller T. and von Fragstein P. (2003): Einfluss der Temperatur auf den Umsatz von Pflanzenresiduen mit engem C/N-Verhältnis. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, im Druck.

- Internet
 - Zum Projekt wurde eine Homepage eingerichtet, auf der die oben genannten und von der BLE genehmigten Veröffentlichungen online verfügbar sind und auch in Zukunft verfügbar gemacht werden, soweit keine anderen urheberrechtlichen Ansprüche bestehen. Die Homepage hat folgende URL:
<http://www.wiz.uni-kassel.de/bbp/Projekte/vegduenger/index.htm>

4.3 Vergleich zwischen Soll und Ist

4.3.1 Verspäteter Projektbeginn

Laut Zeitplan wurde ursprünglich mit einem Projektbeginn im Mai gerechnet. Der endgültige Vertrag lag allerdings erst am 18. Juni 2002 (Kalenderwoche 25) bei uns vor. Insgesamt ergab sich also eine Verspätung von ca. 7 Wochen. Durch zusätzlichen Einsatz von studentischen Hilfskräften konnte diese Verspätung aber wieder ausgeglichen werden.

4.3.2 Versuche

Die Versuche konnten, mit einer Ausnahme, wie vorgesehen abgeschlossen werden. Bei einem der Feldversuche (Möhre) war eine Auswertung der Abschlussbeurteilung wegen einer technischen Panne nicht mehr möglich. Vermutlich kam es zu einer Verwechslung von Pflanzenproben nach der Ernte. Die Bodendaten dieses Versuchs liegen aber in vollem Umfang vor.

Zusätzlich zu den Vereinbarungen im Vertrag, wurden die Versuche um folgende Varianten erweitert:

- Bei den Gefäßversuchen mit Radieschen wurden vier statt zwei Dünger sowie eine zweite Düngungsstufe untersucht.
- Beim Feldversuch mit Radieschen wurden vier statt zwei Düngern untersucht.

Bei den zusätzlichen Varianten wurden nur pflanzliche Messdaten erhoben. Die erhobenen Bodendaten entsprechen den vertraglichen Vereinbarungen.

Der Gefäßversuch mit Radieschen wurde von der "Umfallkrankheit" befallen. Dadurch kam es zum Ausfall einer erheblichen Anzahl von Pflanzen. Die Bodendaten waren dennoch verwertbar. Der Versuch wurde daher mit einer verminderten Bodenbeprobung wiederholt.

4.3.3 Veröffentlichungen

Die oben erwähnten Veröffentlichungen erfüllen die vertraglich zugesagten Verpflichtungen. Für die nächsten Monate sind weitere wissenschaftliche und allgemeinverständliche Veröffentlichungen geplant. Ferner werden Ergebnisse auf verschiedenen Konferenzen und Workshops vorgestellt.

5 Literaturverzeichnis

- Blanke M.M. (1996): Soil respiration in an apple orchard. *Environmental and Experimental Botany*, **36**, 339-348
- Brandt M. (2001): Bodenprofile der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen. *Arbeitsberichte*, **4**, 75 Seiten.
- Brandt M., Heß J. und Wildhagen H. (2002): Flächendeckendes Bodenmonitoring auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen - Kartier- und Analysenergebnisse. *Arbeitsberichte*, **5**, 109 Seiten.
- Braun A., Mayer J. und von Fragstein P. (2001): Sind Leguminosenschrote für die N-Düngung von Frühgemüse geeignet? - Ergebnisse eines Brutversuches. In: Von Leit-Bildern zu Leit-Linien, 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau 6.-8. März 2001, Weihenstephan, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 273-276.
- Brookes P.C., Landman A., Pruden G. und Jenkinson D.S. (1985): Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**, 837-842.
- Isermeyer H. (1952): Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, **56**, 26-38.
- Jenkinson D.S., Hart P.B.S., Rayner J.H. and Parry L.C. (1987): Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. In Cooley J.H. (Hrsg.): Soil Organic Matter Dynamics and Soil Productivity. *Intecol Bulletin*, **15**, 1-8.
- Jensen L.S., Mueller T., Magid J. und Nielsen N.E. (1997): Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed rape straw incorporation in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**, 1043-1055.
- Jensen L.S., Mueller T., Tate K.R., Ross D.J., Magid J. und Nielsen N.E (1996): Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**, 1297-1306.
- Joergensen R.G. (1996): The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**, 25-31.
- Joergensen R.G. und Mueller, T. (1996): The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EN} value. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**, 33-37.

- Kalauch S., Mayer J. und von Fragstein P. (2001): Körnerleguminosenschrote als alternative N-Ergänzungsdünger im Ökologischen Gemüsebau am Beispiel Spinat. In: Von Leit-Bildern zu Leit-Linien, 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau 6.-8. März 2001, Weihenstephan, Verlag Dr. Köster, Berlin, S. 433-436.
- Liedmann O. (2003): Wetterstation der Ultraleicht-Flugschule Kassel-Calden, Lage ca. 7 km ONO von der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, <http://www.ultraleicht.de/wetterseite.htm>.
- Magid J., Henriksen O., Kristensen K.T. und Mueller T. (2001): Disproportionately high N-mineralization rates from green manures at low temperatures -implications for modeling and management in temperate agro-ecosystems. *Plant and Soil*, **228**, 73-82.
- Mayer, J. (2003): Root effects on the turnover of grain legume residues in soil. Doktorarbeit, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Universität Kassel, 118 Seiten.
- Mueller T., Joergensen R.G. and Meyer B. (1992): Estimation of soil microbial biomass C in the presence of living roots by fumigation-extraction. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**, 179-181.
- Mueller T., Jensen L.S., Magid J. und Nielsen N.E (1997): Temporal variation of C and N turnover in soil after oilseed rape straw incorporation in the field: Model simulations with the soil-plant-atmosphere model DAISY - possibilities for improvement. *Ecological Modelling*, **99**, 247-262.
- Müller T., Jensen L.S. und Magid J. (2002): Nitrogen Turnover in Soil after Incorporation of Plant Materials with Different Quality in Organic Farming Systems - Simulation of Lab-Experiments with the DAISY Model. *Ecological Modelling*, **166**, 3-18.
- Mueller T., Jensen L.S., Nielsen N.E. und Magid J. (1998a): Temporal variation of C and N turnover in soil after incorporation of chopped maize, barley straw and blue grass in the field: Mineralization, microbial biomass, extractable organic pools and particulate organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, **30**, 561 - 571.
- Mueller T., Magid J. Jensen L.S. und Nielsen N.E. (1998b): Soil C and N turnover after the incorporation of chopped maize, barley straw and blue grass in the field: Evaluation of a DAISY-model setup. *Ecological Modelling*, **111**, 1-15.
- Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**, 703-707

6 Danksagung

Dieses Projekt wurde über das Bundesprogramm Ökologischer Landbau aus Mitteln des BMVEL finanziert (Projekt nr. 02OE169). Wir danken Dorothea Driehaus, Eberhard Kölsch, Anke Mindermann, Gabi Dormann und allen studentischen Hilfskräften, ohne deren großen Einsatz die Durchführung dieses Projekts nicht möglich gewesen wäre.