

Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Abteilung Pflanzenbau

Abteilungsleiter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Hans-Peter Kaul

Hauptbetreuer: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Hans-Peter Kaul

Nebenbetreuer: Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Gernot Bodner

Einfluss von Zwischenfrüchten auf bodenbürtige Treibhausgasemissionen sowie auf ausgewählte Parameter des Stickstoffkreislaufes

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen
Grades Diplomingenieur an der Universität für
Bodenkultur Wien

Eingereicht von

Mathias Märzendorfer und Michael Harant

März 2014



Danksagung

Diese Diplomarbeit konnte nur dank des großen Engagements von Herrn Dr. Gernot Bodner (BOKU; Department für Nutzpflanzenwissenschaften; Abteilung Pflanzenbau) entstehen. Er war es, der uns ermutigte, unterstützte und dabei half auf dem rechten Kurs zu bleiben. Vor allem aber möchten wir uns bei ihm für die Zeit bedanken, die er sich stets nahm, wenn wir ein Anliegen hatten.

Weiters möchten wir Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Kaul (BOKU; Department für Nutzpflanzenwissenschaften; Abteilungsleiter Pflanzenbau) für die Genehmigung und Betreuung dieser Diplomarbeit danken.

Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Axel Mentler, Herrn Ing. Ewald Brauner, Frau Univ.Prof. Dr.phil. Sophie Zechmeister-Boltenstern, Frau D.I. Astrid Hobel und Frau Elisabeth Kopecky vom Department für Wald- und Bodenwissenschaften/Abteilung Bodenforschung der BOKU danken wir für die Unterstützung bei der Untersuchung der Gasproben und der DOC-Proben.

Unser Dank gilt auch Herrn D.I. Ivica Simonovic und Herrn Josef Schödl, die uns bei den $N_{\min}$ -Probennahmen im Herbst 2012 und im Frühjahr 2013 mit teilweise schwerem Gerät unterstützt und die Arbeit erleichtert haben.

Besonderer Dank gilt Herrn D.I. Franz Xaver Hölzl und Herrn D.I. Thomas Wallner von der Abteilung Boden.Wasser.Schutz.Beratung der LWK OÖ für die sehr gute Zusammenarbeit und die Übernahme der Kosten für die $N_{\min}$ -Proben. In diesem Zusammenhang möchten wir auch Frau D.I. Elisabeth Murauer und Herrn Johannes Recheis-Kienesberger danken.

Danke sagen möchten wir auch Herrn Ing. Christoph Schneiderbauer für die Betreuung und Unterstützung bei der Anlage des Versuchsstandortes im Innviertel.

Frau D.I. Claudia Winkovitsch und Herrn D.I. Willi Peszt von der Abteilung Düngung-, Boden- und Gewässerschutz, Bodenfruchtbarkeit der LWK Bgld gebührt unser Dank für die finanzielle Unterstützung bei der Untersuchung der $N_{\min}$ -Bodenproben im Burgenland.

Weiters möchten wir Herrn D.I. Bernhard Scharf von der Bezirksbauernkammer Wr. Neustadt für die Betreuung des Standortes in Niederösterreich und für die Übernahme der Kosten der Bodenproben für die $N_{\min}$ -Untersuchung danken.

Herzlich danken möchten wir Herrn Raimund Brandstetter und Herrn Robert Sinn von der Saatbau Linz für das zur Verfügung gestellte Begrünungssaatgut für die Anlage der Versuchsflächen.

Auch möchten wir Frau Renate Sapik von der Versuchswirtschaft in Groß-Enzersdorf für die Untersuchung etlicher $N_{\min}$ -Proben, die sich durch die Gasmessungen ergeben haben, bedanken.

Für die Ermöglichung der Anlage des Versuches auf den verschiedenen Standorten in Oberösterreich, Niederösterreich und dem Burgenland möchten wir Familie Sieglinde und Johann Sinzinger, Maria und Ing. Franz Kastenhuber, Maria und Ing. Markus Frösch und Ing. Thomas Gergela unseren ganz besonderen Dank aussprechen.

Danken dürfen wir auch unserem Studienkollegen Christoph Imböck, mit dem uns eine sehr lange und tiefe Freundschaft verbindet, für die Mithilfe bei den $N_{\min}$ -Probennahmen.

Wir danken unseren Eltern, die uns die Ausbildung an der Universität für Bodenkultur ermöglicht haben von ganzem Herzen.

Zum Schluss möchten wir allen Personen, die uns bei dieser Arbeit unterstützt haben und nicht erwähnt wurden, ein Dankeschön aussprechen.

Vorwort

Die Idee zu dieser Masterarbeit wurde im Frühjahr 2012 geboren, da das Thema Zwischenfrüchte für die landwirtschaftliche Praxis große Bedeutung hat und immer wieder diskutiert wird. Für die grundlegende Ausrichtung des Versuches war es wichtig, diesen im Feuchtgebiet durchzuführen, da seitens der Universität für Bodenkultur hauptsächlich im Trockengebiet Versuche angelegt und betreut werden und die hier erzielten Ergebnisse für niederschlagsreichere Produktionsgebiete in Österreich oft nur bedingt übertragbar sind.

Durch gute Kontakte von Dr. Gernot Bodner zur Boden.Wasser.Schutz.Beratung in Oberösterreich und zu Vertretern der Landwirtschaftskammern Niederösterreich und Burgenland bekam der Versuch einen sehr großen Stellenwert und wurde auf insgesamt 5 Standorte in Österreich ausgedehnt. Durch diese sehr erfreuliche Entwicklung der anfänglichen Idee eines kleineren Versuchsaufbaues wurde aber auch der Arbeitsaufwand immer größer und so war es sehr zielführend, dass sich zwei Masterstudierende mit dieser Arbeit beschäftigen. Eine genaue inhaltliche Trennung der Arbeit in der Literaturarbeit und in der Ergebnisauswertung in Trocken- und Feuchtgebiet wurde gemeinsam mit den Betreuern festgelegt.

Der Startschuss für diesen bundesländerübergreifenden Versuch fiel im späten Frühjahr 2012 bei einem gemeinsamen Treffen aller Beteiligten in Linz. Hier wurden der genaue Versuchsaufbau, die einzelnen Versuchsvarianten und die Standorte festgelegt und auch die Frage der Übernahme der Versuchskosten besprochen. Im Juli und August 2012 wurden schließlich die Versuche auf den landwirtschaftlichen Betrieben angelegt und im Herbst 2012 begann dann die eigentliche Datenerhebung. Auch im Frühjahr 2013 waren noch einmal alle Flächen zu beproben und auszuwerten. Durch diese große Menge an Proben war auch die Auswertung der Daten sehr zeitaufwändig.

Inhaltsverzeichnis

1.	Problemstellung und Zielsetzung	1
2.	Literaturübersicht.....	2
2.1.	Zwischenfruchtbau	2
2.1.1.	Entwicklung des Zwischenfruchtanbaues	3
2.1.2.	Funktionen des Zwischenfruchtanbaues.....	4
2.1.3.	Zwischenfrüchte im ÖPUL 2007-2013	6
2.1.4.	Einteilung der Zwischenfrüchte.....	10
2.1.5.	Beschreibung der ausgewählten Zwischenfrüchte	11
2.2.	Bodenfruchtbarkeit und Zwischenfrüchte	17
2.3.	Stickstoffkreislauf	20
2.4.	Gasförmige Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden	23
2.4.1.	Lachgas (N ₂ O)	23
2.4.2.	Kohlendioxid (CO ₂)	37
3.	Material und Methoden	44
3.1.	Versuchsstandorte	44
3.2.	Standortbeschreibung im Feuchtgebiet.....	45
3.2.1.	Ort im Innkreis.....	46
3.2.2.	Pötting	49
3.2.3.	Bad Wimsbach-Neydharting.....	52
3.2.4.	Vegetationsbedingungen im Feuchtgebiet	54
3.3.	Standortbeschreibung im Trockengebiet.....	59
3.3.1.	Lichtenwörth	59
3.3.2.	Wulkaprodersdorf	62
3.3.3.	Vegetationsbedingungen im Trockengebiet	64
3.4.	Versuchsbeschreibung und -anlage	68
3.4.1.	Versuchsanlage.....	68
3.4.2.	Beschreibung der Versuchsvarianten (Zwischenfruchtmischungen)	70
4.	Datenerhebung.....	74
4.1.	Messmethoden der einzelnen Parameter.....	74
4.1.1.	Biomasseaufwuchs (Oberirdische Trockenmassebildung).....	75
4.1.2.	Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt in der oberirdischen Biomasse	75
4.1.3.	Gasförmige Emissionen	76
4.1.4.	Mineralisierter Stickstoff im Boden (N _{min}).....	77
4.1.5.	Bodenfeuchtigkeit und -temperatur	78

4.1.6.	DOC.....	78
4.2.	Statistische Auswertung.....	79
5.	Ergebnisse und Diskussion	81
5.1.	Biomasseaufwuchs (Oberirdische Trockenmassebildung).....	81
5.1.1.	Ort im Innkreis (Feuchtgebiet)	82
5.1.2.	Pötting (Feuchtgebiet).....	83
5.1.3.	Bad Wimsbach-Neydharting (Feuchtgebiet).....	85
5.1.4.	Lichtenwörth (Trockengebiet).....	86
5.1.5.	Wulkaprodersdorf (Trockengebiet).....	88
5.2.	Stickstoffgehalt und C/N - Verhältnis in der oberirdischen Biomasse	91
5.2.1.	Ort im Innkreis (Feuchtgebiet)	92
5.2.2.	Pötting (Feuchtgebiet).....	94
5.2.3.	Bad Wimsbach-Neydharting (Feuchtgebiet)	96
5.2.4.	Lichtenwörth (Trockengebiet).....	98
5.2.5.	Wulkaprodersdorf (Trockengebiet).....	100
5.3.	N _{min} - Gehalt des Bodens	104
5.3.1.	N _{min} -Ergebnisse der Standorte.....	105
5.3.2.	Standortsvergleich der N _{min} -Ergebnisse	112
5.4.	Treibhausgasemissionen	118
5.4.1.	Lachgasemissionen am Standort Pötting	118
5.4.2.	Kohlendioxidemissionen am Standort Pötting.....	123
5.4.3.	Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit am Standort Pötting	128
5.4.4.	Lachgasemissionen am Standort Lichtenwörth	130
5.4.5.	Kohlendioxidemissionen am Standort Lichtenwörth.....	135
5.4.6.	Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit am Standort Lichtenwörth.....	139
5.4.7.	Einfluss der Varianten auf die Emissionshöhe	140
5.4.8.	Einfluss des DOCs und des mineralisierten Stickstoffes auf gasförmige Emissionen..	144
5.4.9.	Ursachen für die Entstehung von bodenbürtigen Treibhausgasemissionen	146
6.	Schlussfolgerungen.....	152
7.	Zusammenfassung.....	159
8.	Summary.....	161
9.	Abbildungsverzeichnis.....	163
10.	Tabellenverzeichnis	167
11.	Literaturverzeichnis	168

1. Problemstellung und Zielsetzung

Die Stickstoffspeicherleistung von Zwischenfrüchten ist neben dem Erosionsschutz der Hauptaspekt ihres Anbaues, da so das Grundwasser vor Nitrat geschützt wird. Im Zuge des ÖPUL kann der Landwirt zwischen einer großen Anzahl an Begrünungsvarianten wählen. Jedoch hat der Anbau von Zwischenfrüchten nicht nur einen positiven Effekt auf die Umwelt, sondern auch auf die Stickstoffspeicherung und die Bereitstellung des Stickstoffes für die Folgekultur. Dies hat eine direkte positive Auswirkung auf die „Geldbörse“ des Landwirtes.

Für die Landwirte stellt sich oft die Frage, welche Begrünungsmischungen sie auf ihren Flächen aussäen sollen. Neben Gesichtspunkten wie einem zuverlässigen Feldaufgang unter schlechten Bedingungen oder ausreichender Bodenbedeckung und damit einhergehender Vermeidung von Verunkrautung stellt sich damit auch die Frage, welche Begrünung hinsichtlich des Stickstoffhaushaltes am günstigsten ist.

In diesem Zusammenhang stellten sich im Laufe der Arbeit folgende Forschungsfragen:

- Welche Unterschiede zwischen verschiedenen Zwischenfruchtvarianten sind im Hinblick auf die Parameter oberirdische Trockenmasse, Stickstoff in der oberirdischen Trockenmasse und $N_{\min}$ im Boden feststellbar?
- Welchen Einfluss hat die Düngung bei Zwischenfrüchten auf die Parameter oberirdische Trockenmasse, Stickstoff in der oberirdischen Trockenmasse und $N_{\min}$ im Boden?
- Welche Bedeutung haben verschiedene Begrünungsvarianten hinsichtlich der gasförmigen Stickstoff- und Kohlenstoffverluste?

2. Literaturübersicht

2.1. Zwischenfruchtbau

Der Begriff Zwischenfrucht bezeichnet in der heutigen Landwirtschaft eine Frucht, welche zwischen zwei Hauptkulturen gesät wird. Nach der Art des Anbaues der Zwischenfrucht werden Zwischenfruchtbau und Untersaaten unterschieden. Diese Form der Gründüngung zwischen zwei Hauptkulturen wurde erst durch die gesteigerte Mechanisierung ermöglicht. Durch freiwerdende Arbeitskapazitäten während der Ernte hielt diese Form der Gründüngung Einzug in die moderne Landbewirtschaftung. Die Zwischenfrucht nutzt hier die Wachstumszeit zwischen zwei Hauptkulturen und wird in ihrer klassischsten Form heutzutage nach Winter- oder Sommergetreide ausgesät, wo im darauffolgenden Jahr Sommerungen wie Mais, Zuckerrübe oder Soja folgen. Die Auswahl der Begrünungspflanzen muss sich an der noch verfügbaren Wachstumszeit orientieren. Des Weiteren ist eine gute Etablierung des Bestandes nur durch eine frühzeitige Saat möglich (vgl. HAMPL, 1996, 8).

Der Begriff Untersaaten ist ebenfalls in der Landwirtschaft seit längerem in Verwendung. Die traditionellste Form der Untersaat ist die Kleeinsaat in Getreidebestände mit folgender Nutzung als Ackerfutterfläche. Hierbei soll die Untersaat möglichst gute Keimbedingungen haben und in der Entwicklung immer hinter der Hauptfrucht sein. Erst mit Ernte der Hauptkultur soll die Untersaat dominant werden und den Boden lückenlos bedecken. Für Untersaaten eignen sich Kleearten und wenige Gräser. Es zeigt sich also, dass durch die hohen Anforderungen die verfügbaren Pflanzenarten eher begrenzt sind (vgl. HAMPL, 1996, 9).

Diese traditionelle Form der Untersaat mit folgender Futternutzung ist heute allerdings weitgehend verschwunden. Ursachen hierfür sind sicherlich die Intensivierung der Landwirtschaft und eine oft gegenseitige negative Beeinflussung von Deckfrucht und Untersaat. Außerdem ist der Bedarf an Ackerfutterfläche durch eine Verringerung der Tierhaltung in den letzten Jahrzehnten auch deutlich zurückgegangen und in der intensiven Tierhaltung wird oft auf ertragsfähigere Formen der Grundfuttererzeugung zurückgegriffen. Nichts desto trotz hat die Untersaat in abgewandelten Formen in den letzten Jahren wieder eine Erneuerung erlebt. So finden seitens verschiedener österreichischer Institutionen

Versuche mit Untersaaten in Getreide und Mais statt, allerdings mit dem Zweck einer folgenden Begrünung und Nutzung als Zwischenfrucht mit geringer oder ohne Bodenbearbeitung. Hierzu werden, wie früher üblich, Kleemischungen im Frühjahr in Getreidebestände oder erst später in den bereits gut entwickelten Bestand eingesät. Eine weitere, zurzeit erprobte Methode ist die Mähdruschsaat, bei welcher direkt bei der Ernte Untersaaten angelegt werden. Für diesen späten Einsatz eignen sich aufgrund der Raschwüchsigkeit eher Pflanzen aus der Familie der Kreuzblütler. Als Vorteile einer solchen Untersaat in Getreidebestände werden vor allem Arbeits- und Kostenersparnis für den Landwirt, eine rasche Wiederbegrünung des Feldes, die gute Unkrautunterdrückung, eine hohe Tragfähigkeit des Bodens und ein effektiver Grundwasserschutz durch die dauerhafte Bindung von Nährstoffen angeführt (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 46).

2.1.1. Entwicklung des Zwischenfruchtanbaues

Das Wort „Gründüngung“ wird in der landwirtschaftlichen Praxis im Sprachgebrauch erst seit dem letzten Jahrhundert verwendet. Die Entwicklung des Zwischenfruchtanbaues reicht in der Geschichte allerdings sehr weit zurück. So haben bereits frühe Ackerbaukulturen zwischen ihren Hauptfrüchten weitere Früchte zur Bodenerholung und Bodenverbesserung gezielt oder auch ungezielt in die Fruchtfolge eingeplant. Im 19. Jahrhundert wurde Gründüngung für den Humusaufbau und die Nährstoffanreicherung des Bodens verwendet. So wurden viele karge und nährstoffarme Böden durch den gezielten Einsatz von Leguminosen zur Gründüngung aufgewertet. Hier wurde auch erstmals die atmosphärische Stickstoffbindung durch Hermann Hellriegel erklärt. Gerade in der Zeit während der beiden Weltkriege, die durch eine enorme Produktionsmittelverknappung gekennzeichnet war, wurde der Wert der Begrünung sehr deutlich. So konnte durch die Stickstoffbindung und die Förderung des Bodens der Ertrag erhalten werden. Durch die billige Erzeugung von chemisch synthetischen Stickstoffdüngemitteln verlor die Gründüngung nach dem 2. Weltkrieg an Bedeutung. Durch den Dünge- und Pflanzenschutzmitteleinsatz war es möglich, die Produktion enorm zu steigern und es konnte auf eine Gründüngung verzichtet werden. Erst in den 1970er Jahren erfolgte aufgrund einer Steigerung der Energiekosten und der bereits aufgetretenen ökologischen Schäden der letzten Jahrzehnte wieder ein Umdenken. Mit dem

zunehmenden Umweltgedanken wurde die Gründüngung in ihren verschiedensten Variationen wieder Bestandteil der modernen Felderwirtschaft (vgl. HAMPL, 1996, 7).

2.1.2. Funktionen des Zwischenfruchtanbaues

In ungestörten Ökosystemen gibt es keinen nackten Boden. Das System Immergrün hat hier eine entscheidende Wirkung auf die Stabilität, Ertragsfähigkeit und die Artenvielfalt des Bodens. Betrachtet man heutige Fruchtfolgen, sieht man, dass immer wieder Platz wäre für Begrünungen und Zwischenfrüchte. Hier ließe sich oft eine Schwarzbrache durch die Aussaat einer Begrünungsmischung verhindern (vgl. HAMPL, 1996, 27).

Eine dauerhafte Bodenbedeckung schützt den Boden vor Erosion. Der Niederschlag vor allem in Form von Regen, wird durch einen dichten Pflanzenbestand gebremst, hohe Niederschlagsmengen können besser in den Boden infiltrieren, und so führt ein Starkregen zu keiner Abschwemmung des wertvollen Ackerbodens. Durch den Anbau von Pflanzen mit intensiver Durchwurzelung des Bodens kommt es zu einer natürlichen Bodenlockerung und zum Aufbrechen von Verdichtungen. Hierzu eignen sich Kulturen wie Luzerne oder Ölrettich mit ihren tiefreichenden Wurzeln (vgl. KASTENHUBER, 2010, s.p.).

Die organische Substanz führt zu einer Humuserhaltung und -vermehrung. Zwischenfrüchte hinterlassen viel leicht abbaubaren Nährhumus, welcher Nahrung für das Bodenleben ist und so die Krümelstruktur aufbaut. Unter dem Schutz der Zwischenfrucht bildet sich eine sogenannte Schattengare aus. Dieser Boden ist gut durchlüftet und eine Vielzahl von Bodenorganismen befindet sich in der obersten Bodenschicht.

Durch einen dichten Bestand geht weniger Wasser unproduktiv durch Evaporation verloren. Hier ist zu beachten, dass ein Begrünungsbestand etwa 100 mm Wasser benötigt. Die Sickermenge wird also durch das Wachstum der Begrünung verringert und somit auch die Gefahr der Nährstoffauswaschung (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 7).

Durch den Anbau von Leguminosen kommt es zu einer Stickstoffanreicherung im Boden, welche wiederum für die Folgekultur zur Verfügung steht. Futterleguminosen produzieren außerdem hochwertiges Futter und helfen so beim Aufbessern von Futtermangel zur Silage-

oder Heugewinnung. Ein weiterer positiver Aspekt von Zwischenfrüchten ist, dass sie einen wertvollen Beitrag zur Schädlings-, Unkraut- und Krankheitsbekämpfung leisten. So werden Unkräuter durch den Lichtentzug unterdrückt oder Schädlinge durch den Anbau von „Kampfpflanzen“, wie dem nematodenresistenten Senf, verringert. Krankheitserreger werden durch die hohe biologische Aktivität im Boden abgebaut und die Fähigkeit zur Abwehr wird gesteigert (vgl. KASTENHUBER, 2008, 26).

Eine Zwischenfrucht reduziert die Nährstoffauswaschung in tiefere Bodenschichten beziehungsweise in weiterer Folge ins Grundwasser. Durch die biologische Nährstoffspeicherung in der Pflanzenmasse der Zwischenfrüchte kommen diese bei der Folgefrucht direkt zur Geltung. Phosphor, Kalium und Magnesium sind direkt für die Folgekultur nutzbar und anrechenbar (vgl. KASTENHUBER, 2008, 26). Stickstoff, beispielsweise aus organischen Düngemitteln, der zur Zwischenfrucht ausgebracht wird, wird in der organischen Substanz gespeichert und ist durch deren Abbau in den Folgejahren wieder für die Hauptkulturen verfügbar. Durch die Speicherung der Nährstoffe können diese nicht ausgewaschen werden und das Grundwasser wird nicht mit Nitrat belastet (vgl. HAMPL, 1996, 33).

Eine weitere Funktion von Zwischenfrüchten ist der gesellschaftliche Effekt. Begrünungen sollten für die Darstellung der Leistungen von Landwirten gegenüber der Gesellschaft herangezogen werden. Schön blühende Flächen sind eine Augenweide und dienen auch zur „Imagepflege“ für die Landwirte (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 7).

Eine gelungene Zwischenfrucht führt im Allgemeinen zu einem höheren und sicheren Ertrag der Folgefrucht. Die „Verlebendigung“ des Bodens durch die Zufuhr an organischer Substanz und somit eine Förderung der Bodenlebewesen wirkt ertragssteigernd. Durch den Schutz des Bodens vor Nährstoffauswaschung, Erosion und der Erhaltung der Krümelstruktur lässt sich ein hoher Vorfruchtwert der Begrünung erreichen (vgl. KASTENHUBER, 2008, 27).

2.1.3. Zwischenfrüchte im ÖPUL 2007-2013

Die geschichtliche Entwicklung der Gründüngung beziehungsweise des Zwischenfruchtanbaues zeigt also, wie enorm wichtig solche Maßnahmen für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit sind. Gerade in heutigen, oft eintönigen und intensiven Fruchtfolgen nehmen Begrünungen vielfältige Aufgaben wahr.

Das Österreichische Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft, kurz ÖPUL genannt, trägt der vielfältigen Funktion von Zwischenfrüchten Rechnung und beinhaltet eine eigene Maßnahme zur Förderung von Begrünungen von Ackerflächen. Im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union, kurz GAP genannt, welche aus 3 Säulen besteht, werden im Rahmen der 2. Säule für die Ländliche Entwicklung Gelder unter anderem für Begrünungsmaßnahmen ausbezahlt. Diese ländliche Entwicklung mit dem Ziel einer multifunktionalen, nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Land- und Forstwirtschaft beinhaltet die Agrarumweltmaßnahmen (ÖPUL), die Ausgleichszulage für benachteiligte Gebiete (AZ) und Investitions- und Bildungsprogramme (vgl. BMLFUW, 2012, 118).

Das erste Agrarumweltprogramm wurde mit dem Beitritt Österreichs zur Europäischen Union 1995 gestartet. 1998 folgte das ÖPUL 98 und ab 2000 das 3. Agrarumweltprogramm ÖPUL 2000. Das aktuell noch gültige ÖPUL 2007 ist somit das vierte derartige Agrarumweltprogramm und gilt bis zum Beschluss eines neuen Programmes Ende 2013 (vgl. BMLFUW, 2012, 118).

Das ÖPUL ist mit rund 549 Millionen Euro für das Jahr 2011 die wichtigste dieser Teilmaßnahmen und beinhaltet selbst wieder mehrere Untermaßnahmen, darunter die Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“. Die Prämienverteilung für das Jahr 2011 sieht für die Begrünungsmaßnahme rund 12% am gesamten Fördertopf vor. Es liegt somit nach den Maßnahmen „Umweltgerechte Bewirtschaftung“ und „Biologische Wirtschaftsweise“ mit zusammen rund 38% der Mittel an dritter Stelle. Am gesamten ÖPUL nahmen 2011 114.508 Betriebe und somit fast 77% aller österreichischen Betriebe mit rund 89% der Fläche teil. Diese Zahlen zeigen den großen Stellenwert des ÖPUL beziehungsweise auch der Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“ (vgl. BMLFUW, 2012, 115).

Betrachtet man die Daten für das Jahr 2011 für die Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“ genauer, so nehmen 48.910 Betriebe an dieser Maßnahme teil und davon betreiben dann 14.995 Betriebe zusätzlich im folgenden Jahr Mulch- oder Direktsaat. Dies ergibt eine Gesamtfläche von Begrünungsmaßnahmen von 429.293 Hektar und 139.851 Hektar Mulch- und Direktsaat (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2012, s.p.).

In den zukünftigen Förderperioden wird es wichtig sein, vor allem die Begrünungsmaßnahme aufgrund der regen Anteilnahme und des großen ökologischen Wertes fortzusetzen.

ÖPUL Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“

Die Ziele der Begrünung von Ackerflächen zwischen zwei Hauptkulturen im Rahmen des ÖPUL, zum Beispiel zwischen Wintergetreide und Körnermais, sind eine Reduktion der Nährstoffauswaschung in das Grundwasser und des Nährstoffaustrages in Oberflächengewässer. Hierbei ist vor allem der Nährstoff Stickstoff in seiner auswaschungsgefährdeten Form als Nitrat von Bedeutung. Ein weiteres Ziel ist der Schutz des Bodens vor Wind- und Wassererosion. Der Schutz vor Windverfrachtung des Bodens ist vor allem in den östlich gelegenen Teilen des Trockengebietes von großer Bedeutung. Die Abschwemmung von Erdmaterial durch Wasser ist für alle Hanglagen Österreichs zutreffend. Eine Begrünung leistet überdies einen großen Beitrag zur Biodiversität für Tier und Pflanze. So sind solche Flächen im blühenden Zustand eine Bienenweide, sie bieten Schutz und Unterschlupf für viele verschiedene Tierarten und sind eine Bereicherung in der oft sonst kargen Fruchtfolge (vgl. AGRARMARKT AUSTRIA, 2007, 1).

Um eine Förderung aus dem Topf des ÖPUL zu erhalten, muss der landwirtschaftliche Betrieb bestimmte Mindestvoraussetzungen in den Bereichen Mindestfläche, Mindestbegrünungsanteil und den zulässigen und unzulässigen Begrünungskulturen einhalten.

Der Betrieb muss im Jahr der Antragsstellung mindestens 2 Hektar Ackerfläche bewirtschaften und jährlich müssen mindestens 25% der gesamten Ackerfläche flächendeckend begrünt werden. Als Stichtag gilt hier der 1. Oktober. Die Prämie wird für

maximal 40% der begrünten Fläche gewährt (vgl. VEREIN ÖÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2010, s.p.).

In den Voraussetzungen sind ebenfalls zulässige und nicht zulässige Begrünungskulturen geregelt. Zulässige Kulturen wären abfrostdende (Senf, Ölrettich, Phacelia,...) und winterharte (Perko, verschiedene Kleearten,...) Gründecken, Grünschnittroggen und aktiv angelegte Untersaaten. Als nicht zulässige Kulturen gelten Ausfallsamen von Hauptkulturen, Getreide und Mais, Elefantengras, Energieholz, Erdbeeren und einige mehr. Außerdem sind K 20-Flächen, Bestände mit einem Kulturartenanteil größer als 50% Getreide oder Mais und GLÖZ-Flächen von den erlaubten Begrünungskulturen und -flächen ausgenommen (vgl. AGRARMARKT AUSTRIA, 2007, 1).

Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die möglichen Begrünungsvarianten. Insgesamt stehen im ÖPUL 2007 acht verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Anlage- bzw. Umbruchterminen und verschiedenen Begrünungskulturen zur Auswahl. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur exemplarische Beispiele der Begrünungskulturen angeführt.

Tabelle 1 Begrünungsvarianten (vgl. NEUBAUER, 2008, 31)

Variante	Anlage bis	Frühester Umbruch	Besonderheiten	Prämie
A	20.08.	16.11.	Anlage einer abfrostenden/winterharten Begrünungskultur Bodenbearbeitung nicht erlaubt bis 16.11. Herbizideinsatz verboten	160€
A 1	31.07.	16.10.	Anlage einer abfrostenden Begrünungskultur Ab 16.10. verpflichtender Anbau von Wintergetreide Herbizideinsatz verboten	
B	20.09.	02.03. des Folgej.	Anlage einer abfrostenden Begrünungskultur	130€
C	15.10.	02.03. des Folgej.	Verwendung winterharter Begrünungen z.B: Klee, Luzerne, Perko, Engl. Raygras,... Im folgenden Mehrfachantrag aber keine Hauptkultur	
C 1	15.10.	02.03. des Folgej.	Weitere Einschränkung der Verwendung winterharter Begrünungskulturen aus Variante C: Englisches Raygras, Perko, Grünschnittroggen,...	160€
D	31.08.	02.03. des Folgej.	Anlage von mindestens 2 abfrostenden Begrünungskulturen im Gemenge Folgekultur mittels Mulch- oder Direktsaat zu bestellen	190€ + Mulchsaatbonus 40€
D 1	31.08.	02.03. des Folgej.	Anlage von mindestens 2 winterharten Begrünungskulturen im Gemenge Herbizideinsatz verboten	
H	15.10.	Kein Umbruch	Begrünung ist im darauffolgenden Jahr eine Hauptkultur → Ausweisung im MFA Verwendung winterharter Kulturen: Klee, Klee gras, Luzerne, Englisches Raygras, Grünschnittroggen,...	130€

2.1.4. Einteilung der Zwischenfrüchte

Die verschiedenen Kulturen lassen sich grob in 4 Gruppen einteilen. Die Kreuzblütler nehmen hier neben den Leguminosen den höchsten Stellwert ein. Sie sind gekennzeichnet durch ein schnelles Wachstum, auch unter kühlen Bedingungen im Herbst. Sie besitzen eine Pfahlwurzel, um sich Nährstoffe gut aneignen zu können und auch vor Auswaschung zu schützen. Beispiele für Kreuzblütler sind Senf, Raps, Rübsen, oder Ölrettich (vgl. HAMPL, 1996, 65).

Die Leguminosen als weitere wichtige Gruppe können in Symbiose mit den Knöllchenbakterien Stickstoff aus der Luft binden und speichern. Diese Pflanzen helfen in der Fruchtfolge den Zukauf von synthetischem Dünger zu reduzieren und sind deshalb in der biologischen Landwirtschaft unersetzlich. Werden die Leguminosen mehrjährig genutzt, bilden sie ein feines Wurzelsystem aus, welches eine große Fläche durchwurzelt und so den Boden in einem idealen Zustand schützt. Als Beispiele für die Leguminosen wären anzuführen Winter- und Sommerwicke, Feld- und Futtererbse, Platterbse, Ackerbohne, Lupine, Luzerne, Rotklee, Gelbklee, Weißklee, Schwedenklee, Inkarnatklee, Alexandrinerklee (vgl. HAMPL, 1996, 65).

Gräser zeichnen sich durch hohe Wurzelmenen, aber durch ein eher seichtes Wurzelsystem aus. Sie eignen sich vorwiegend für den mehrjährigen Gemengeanbau, zum Beispiel in Kombination mit Klee zu einem Klee grasbestand. Hier ergibt sich auch eine ideale Symbiose. Die Leguminosen sammeln Stickstoff und die Gräser setzen diesen in ein effektives Massenwachstum um. Als Beispiel für Gräser sind zu nennen: Deutsches Weidelgras, Raygräser, Wiesenschwingel, Knautgras, Wiesenrispe, Grünroggen und einige mehr (vgl. HAMPL, 1996, 66).

Die vierte Gruppe setzt sich aus unterschiedlichen Pflanzenfamilien zusammen. Die Bedeutung der Begrünungspflanzen dieser Gruppe nimmt immer mehr zu, da diese Pflanzen nicht derselben Familie wie jene der Hauptkulturen (Kreuzblütler) angehören. Hierzu zählen Pflanzen wie der Buchweizen oder die Phacelia. Diese beiden Pflanzen blühen recht bald und bilden für die Insekten ein gutes Futterangebot. Sie frosten im Herbst sicher ab und hinterlassen im Frühjahr eine gut zu bearbeitende Mulchschicht (vgl. HAMPL, 1996, 66). Eine

weitere neue Kultur ist das Ramtillkraut (*Guizotia abyssinica*), welches in der landwirtschaftlichen Praxis als Mungo bezeichnet wird. Das Ramtillkraut gehört zur Familie der Korbblütler (*Asteraceae*).

2.1.5. Beschreibung der ausgewählten Zwischenfrüchte

Im folgenden Text werden jene Zwischenfrüchte genauer beschrieben, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden.

Senf

Senf (*Sinapis alba* L.) ist die bedeutendste Zwischenfruchtart in der Familie der Kreuzblütler (*Brassicaceae*). Andere Senfarten sind zum Beispiel der Sarepta-Senf (*Brassica juncea* L.) oder der Schwarze Senf (*Brassica nigra* L.), welche allerdings heute im praktischen Anbau noch keine große Rolle spielen. Die Vorteile des Sareptasenfes wurden aber immer wieder in Versuchen nachgewiesen. Senf ist eine typische Langtagpflanze mit einer deutlichen Blühneigung bei Fröhsaaten. Assimilate werden hier für die Blütenbildung verwendet und die Ausbildung der Wurzel und der oberirdischen Biomasse bleibt eher zurück (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 31).

Senf als einjährige Pflanze bildet eine tiefgehende, verzweigte und spindelförmige Wurzel. Senf kann im Anbau eine Wuchshöhe von 1 bis 2 m erreichen und ist in Mischungen oft der dominante Partner. Deshalb sollte immer auf die Saatstärke geachtet werden (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 35).

Ein großer Vorteil von Senf ist die große Anpassungsfähigkeit und die Anspruchslosigkeit. So keimt Senf auch auf der rauen Ackerscholle aus und bildet eine ausreichende Bodenbedeckung. Auf tonreichen Böden und bei Staunässe kann sich der Senf allerdings nicht etablieren und sollte auf solchen Standorten nicht angebaut werden. Hinsichtlich der Aussaat ist er sehr tolerant. Eine Aussaat mit dem Schleuderstreuer, Säkasten oder auch der Drillsämaschine ist ohne weiteres möglich (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 35). Senf kann hier fast als Pionierpflanze bezeichnet werden (vgl. HAMPL, 1996, 89).

Da Senf zur Familie der Kreuzblütler gehört, muss auf die Fruchtfolgegestaltung beziehungsweise auf einen entsprechenden Verzicht von Senf in Raps- oder Zuckerrübenfruchtfolgen geachtet werden. Durch nematodenresistente Sorten kann er in Zuckerrübenfruchtfolgen Verwendung finden und stellt hier sogar eine Nematodenfeindpflanze dar (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 35).

Im Herbst erträgt Senf Temperaturen bis minus 5 Grad Celsius. Eine ausreichende Entwicklung der Pflanzen ist für das sichere Abfrieren erforderlich. Im Frühjahr kann Senf sehr gut eingearbeitet werden, da die Stängel sehr leicht brechen und eine gute Mulchschicht hinterlassen (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 35).

Im Unterschied zum Gelbsenf bildet Sareptasenf (*Brassica juncea* L.) eine größere Blattmasse aus und kann hinsichtlich des Erscheinungsbildes eher mit Raps verglichen werden. Er bildet ziemlich breite und fleischige Blätter aus, welche nach dem ersten Frost abfallen. Die Pflanze selbst bleibt noch längere Zeit aufrecht stehen. Die Blühneigung von Sareptasenf ist ebenfalls deutlich geringer als bei Gelbsenf und er ist somit besonders auch für Frühsaaten geeignet.

Sareptasenf kann in Rüben- und Rapsfruchtfolgen aufgrund der Krankheits- und Schädlingsübertragung zum Problem werden. So steigt die Nematodengefahr und in Fruchtfolgen mit anderen Kreuzblütlern kann es zu einer Übertragung von Phoma kommen (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 34).

Ölrettich

Ölrettich (*Raphanus sativus* L.) gehört der Familie der Kreuzblütler (Brassicaceae) an. Diese einjährige Pflanze mit starkem Blattwuchs und einer ausgeprägten Wurzelbildung ist eine der wichtigsten Begrünungspflanzen im Zwischenfruchtanbau. Die starke, tiefreichende Pfahlwurzel mit einem ausgeprägten Nebenwurzelsystem kann Verdichtungen im Boden sehr gut aufbrechen und auch Nährstoffe sehr gut aufschließen und speichern (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29). Der Stängel ist behaart und hat kräftige, eingeschnittene und fiedrige Blätter (vgl. HAMPL, 1996, 87).

Hinsichtlich der Standortansprüche ist der Ölrettich sehr tolerant und wenig empfindlich auf Trockenheit. Auch bei einer späteren Aussaat bildet er noch zuverlässig Biomasse. Bei einer frühen Aussaat bis Mitte August verringert sich die Rettichbildung, die Blütenneigung wird jedoch gefördert (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29). Die ausgeprägte Langtagreaktion bewirkt den Übergang zur generativen Phase mit einer Stängel- und Blütenbildung. Hinsichtlich der Züchtung wird heute auf Sorten mit geringer Blühneigung bei gleichzeitig hoher Biomasseproduktion geachtet (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 31). Die Aussaat kann mittels Schleuderstreuer, Säkasten oder auch mit der Drillsämaschine erfolgen.

Aufgrund der Familienzugehörigkeit besteht die Gefahr einer Krankheits- und Schädlingsübertragung in kreuzblütlerlastigen Fruchtfolgen. Nematodenresistente Sorten können in Rübenfruchtfolgen Abhilfe schaffen. In intensiven Rapsfruchtfolgen sollte unter Umständen auf diesen Mischungspartner verzichtet werden (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29). Spezielle Ölrettichsorten ermöglichen eine biologische Bekämpfung der Rübennematode (*Heterodera schachtii*) bei frühen Saatterminen. Nach der Besiedlung der Ölrettichwurzeln durch die Nematoden wird durch spezielle Resistenzmechanismen eine weitere Entwicklung unterbunden (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 31).

Die Biomasse frostet im Herbst sicher ab und bildet eine mürbe, gut verrottende Mulchschicht (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29). Spät auflaufende Pflanzen, die in der Entwicklung zurückbleiben, können im Frühjahr wieder austreiben und stellen dann Probleme in der Folgefrucht dar (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 31).

Phacelia

Phacelia (*Phacelia tanacetifolia* L.) oder auch Büschelschön genannt, gehört zur Unterfamilie der Wasserblattgewächse (Hydrophyllaceae) in der Familie der Raublattgewächse (Boraginaceae). Diese Pflanze ist somit mit keiner anderen Kulturpflanze verwandt und im Gegensatz zu den Kreuzblütlern besteht die Gefahr einer Krankheitsübertragung hier in keinsten Weise (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 34).

Phacelia stammt aus Kalifornien und wächst überall in Europa. Diese einjährige Pflanze hat einen aufrechten Trieb bis 70 cm Höhe und alle Pflanzenteile sind behaart. Die Blätter sind gefiedert und die Blüten sind ährenförmige Trauben mit einer hellblauen bis lila Färbung (vgl. HAMPL, 1996, 96).

Phacelia zeichnet sich durch eine rasche Jugendentwicklung und eine hohe Beschattungsintensität aus, wodurch der Boden relativ rasch abgedeckt wird. Sie zeigt auch eine gute Durchwurzelung des Bodens mit einer großen Anzahl an Feinwurzeln. Durch diese intensive Bewurzelung werden Nährstoffe gut aufgenommen und für die Folgekultur gespeichert. Auch Trockenheit wird sehr gut vertragen (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 30).

Hinsichtlich der Standortansprüche meidet Phacelia kühle, zu feuchte Standorte. Ansonsten gedeiht sie auf allen Standorten sehr gut. Phacelia zählt zu den Dunkelkeimern und daher ist bei der Saat auf eine entsprechende Bodenbedeckung von 1 bis 2 cm zu achten. Feinkrümelige Saatbeete werden bevorzugt und diese führen zu einem raschen Bodenschluss. Somit ist hier beim Anbau größere Sorgfalt geboten, als bei den Kreuzblütlern. Eine Aussaat mittels Sämaschine hat sich in den letzten Jahren bewährt und ein zeitgerechter Anbau bis Mitte August fördert eine reiche Massenentwicklung (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 30). Hinsichtlich der Mischungseignung ist Phacelia sehr variabel einsetzbar, sollte aber aufgrund der möglichen Dominanz mit 1,5 kg/ha am Mischungsverhältnis begrenzt werden (vgl. HAMPL, 1996, 96).

Phacelia bereichert die Landschaft und ist auch für Bienen eine gute Nektarquelle. Im Herbst friert Phacelia sicher ab und hinterlässt eine gut zu bearbeitende Mulchschicht. So treten bei folgender Bearbeitung im Frühjahr nur sehr selten Probleme mit Phaceliabeständen auf (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 30).

Mungo (Ramtillkraut)

Ramtillkraut (*Guizotia abyssinica* L.) wird umgangssprachlich auch als Mungo bezeichnet. Dieser Begriff ist die Bezeichnung einer Saatgutfirma für das Ramtillkraut. Ramtillkraut ist eine einjährige, krautige Pflanze mit gelben Blüten und wird bis zu 2 Meter hoch. Mungo

gehört der Familie der Korbblütler an und ist somit wieder nur mit der Sonnenblume als Kulturpflanze direkt verwandt und folglich für Raps- und Zuckerrübenfruchtfolgen sehr gut geeignet. Im Wachstum bildet die Pflanze eine große Biomasse aus. Auch das Wurzelsystem ist entsprechend gut mit einem Pfahl- und Seitenwurzelsystem bis in eine Tiefe von 25 bis 30 cm ausgebildet. Mungo verträgt Trockenheit sehr gut. Auf verdichteten oder vernässten Standorten zeigt die Pflanze ein verringertes Wurzelwachstum.

Hinsichtlich der Aussaat ist Ramtillkraut sehr tolerant und diese kann sowohl mit Sämaschine, Düngerstreuer als auch mit Säkasten erfolgen. Eine leichte Bedeckung des Saatgutes mit Erde fördert das Auflaufen. Durch die rasche Massenbildung wird das Unkraut sehr gut unterdrückt, bei einem Überangebot an Stickstoff oder einer zu hohen Aussaatmenge von über 2 kg im Gemenge nimmt Mungo die dominierende Rolle ein.

Ramtillkraut ist sehr frostempfindlich und stirbt bereits bei den ersten leichten Frösten im Herbst sofort ab. Die Pflanze zeigt hier eine dunkle Verfärbung. Nach dem vollständigen Abfrosten fällt die Pflanze um und verrottet sehr leicht auf der Bodenoberfläche. Die nicht verholzte, feinstängelige Biomasse eignet sich ideal für Mulchsaat und stellt keine Probleme bei der Bearbeitung dar (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29).

Kresse

Die Kresse gehört der Familie der Kreuzblütler an. Die Pflanze zeichnet sich durch einen raschen aufrechten Wuchs aus. Die Blätter sind klein und bilden wenig Biomasse. Die Blüten sind typisch kresseartig und weiß gefärbt. Der Kressegeruch und -geschmack macht sie unverkennbar. In Mischungen kann sie den Bestand durchaus auflockern, auch wenn der reine Kresseaufwuchs eher bescheiden ist.

Kresse zeigt eine rasche Jugendentwicklung, welche mit der von Senf vergleichbar ist. Die Pflanze entwickelt sich sehr rasch, außer bei einer schlechten Stickstoffversorgung. Eine entsprechende Düngung, zum Beispiel mit Wirtschaftsdüngern, wird von der Kresse sehr effektiv für die Biomasseproduktion genutzt. Die Unkrautunterdrückung kann als gut bezeichnet werden.

Die Ansprüche an das Saatbeet sind sehr gering und das Saatgut kann auch mit einem Schleuderstreuer oder einem Säkasten ausgebracht werden. Ein idealer Aufgang ist mittels Drillsämaschine zu erreichen.

Hinsichtlich der Sorte können bei Kresse zwei verschiedene Typen unterschieden werden. Die sogenannte Großblättrige Gartenkresse mit dem Sortenname MEGA und die einfache Gartenkresse. Die Sorte MEGA zeigt einen schnellen Aufgang, ist sehr krankheitsunempfindlich und bildet viel Biomasse (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 6).

Alexandrinerklee

Alexandrinerklee (*Trifolium alexandrinum* L.) gehört zur Familie der Leguminosen (Schmetterlingsblütengewächse) und stammt aus dem östlichen Mittelmeergebiet (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 29). Diese Pflanze zeichnet sich durch die für Leguminosen typische Bindung von atmosphärischem Luftstickstoff aus und so kann über die Zwischenfrüchte Stickstoff nicht nur gespeichert, sondern auch produziert werden.

Alexandrinerklee ist eine einjährige Pflanze mit einer Wuchshöhe bis zu 1 Meter. Die Pflanze bestockt sehr gut, hat aber eine eher geringe Nachwuchsleistung. Die Blätter sind dreiteilig und länglich mit gelblich-weißen Blüten an den Triebspitzen (vgl. HAMPL, 1996, 82).

Das Jugendwachstum ist eher langsam und daher besteht die Gefahr der Verunkrautung. Dieses Problem kann durch eine angepasste Begrünungsmischung mit anderen raschwüchsigeren Pflanzen behoben werden. Wird der Klee als Futter genutzt, empfiehlt es sich, einen Reinigungsschnitt einzuplanen. Einschnittige Formen sind eher im Zwischenfruchtanbau zu verwenden, da diese eine schnellere Jugendentwicklung zeigen. Die Wurzelmasse ist eher gering und verrottet aufgrund des engen C/N-Verhältnisses sehr zügig. Der Stickstoff wird dabei rasch mineralisiert (vgl. LÜTKE ENTRUP, 2001, 24).

Die Bearbeitung im Frühjahr stellt keine Probleme dar. Die Pflanzenmasse bricht sehr leicht und stellt eine gut zu bearbeitende Mulchschicht dar.

2.2. Bodenfruchtbarkeit und Zwischenfrüchte

In einem fruchtbaren Boden können sich in einer Handvoll Erde bis zu fünf Milliarden Bodenlebewesen befinden. Die Bodenlebewesen tragen dazu bei, dass ein Boden Wasser, Luft, Nährstoffe, etc. speichern, freisetzen und abgeben kann. Außerdem kann der Boden Schadstoffe puffern und Keime abtöten.

Die Fruchtbarkeit des Bodens ist für die Produktivität eines Ackers der wichtigste Faktor. Deshalb ist eine besondere Sorgfalt auf den Erhalt und die Förderung der Fruchtbarkeit zu legen. Die Ausbildung von Bodenaggregaten ist Grundlage der Krümelstruktur des Bodens. Die Aggregatbildung wird durch Bodenorganismen gefördert, die die mineralischen Teilchen mit organischer Substanz verkitten. Es muss zwischen den Aggregaten erster und zweiter Ordnung unterschieden werden. Für die Ausbildung eines krümeligen Bodens ist die Aktivität der Bodenlebewesen entscheidend. So wie alle Lebewesen benötigen auch sie Nahrung. Diese erhalten sie in Form organischer Substanz, welche oberirdisch durch Blätter und Stängel und unterirdisch durch Wurzeln vorhanden ist. Wurzeln produzieren durch das Abstoßen von Feinstwurzeln und das Ausscheiden von Wurzelexsudaten organisches Material, das den Mikroorganismen direkt als Futter zur Verfügung steht. Selbstverständlich liefern abgestorbene Wurzeln den größten Anteil an organischer Substanz. Je mehr Wurzelmasse gebildet wird, desto mehr Nahrung ist für die Bodenlebewesen vorhanden und desto fruchtbarer ist der Boden. Bei der Wurzelmasse kommt es auf den Anteil an Feinwurzeln an. In einem gut gelockerten Boden ohne Verdichtungen können die Wurzeln den Boden gut durchwachsen und somit Wasser- und Nährstoffvorräte nutzen, zugleich bringen sie aber auch organische Substanz in den Boden, welche den Mikroorganismen wiederum als Nahrungsquelle dient. Die Wurzeln der Zwischenfrüchte bilden oftmals sehr tiefreichende Wurzelsysteme aus, wodurch es zu einer Anreicherung organischen Materials vor allem in der Unterkrume kommt (vgl. HAMPL, 1996, 17).

Negative Einflüsse wie etwa die Bodenerosion können durch den Anbau von Zwischenfrüchten reduziert werden. Zwischenfrüchte haben des Weiteren Einfluss auf den Umwelt- und Pflanzenschutz. Außerdem unterdrücken sie das Unkraut, was den Einsatz von Herbiziden senkt. Bei den Zwischenfrüchten muss auch unbedingt der Aspekt der Gülleverwertung bzw. der Nährstoffaneignung in Betracht gezogen werden. Sie nehmen die

Nährstoffe im Herbst noch gut auf, speichern den Stickstoff in ihrer organischen Substanz über den Winter und reduzieren dadurch die Nitratauswaschung während des Winters, wobei sie im Frühjahr die Nährstoffe wieder freigeben (Vorfruchtwirkung- bzw. wert) (vgl. RENIUS et al., 1992, 17).

Die Bodenerosion tritt vor allem dann auf, wenn der Boden nackt ist, d.h. wenn auf ihm keine Pflanzen wachsen. In den letzten Jahren wurden die positiven Effekte eines Zwischenfruchtanbaues nicht nur im Bezug auf den Erosionsschutz deutlich, wodurch der Anbau von Zwischenfrüchten mittlerweile zur landwirtschaftlichen Praxis gehört. Der Bewuchs mit Pflanzen schafft einen fruchtbaren, krümeligen und belebten Boden. Ein begrünter Acker ist somit Voraussetzung für einen erosionsstabilen Boden. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten und deren Wurzelwachstum wird das Bodenleben und somit die Bildung von Bodenaggregaten gefördert. Die Wurzeln der Pflanzen sind durch deren Wachstum und Absterben Nahrung für die Bodenorganismen. Aber auch die oberirdische Pflanzensubstanz dient den Bodenorganismen nach dem Einarbeiten beziehungsweise Abfrosten als wichtige Nahrungsquelle. Dadurch fördern also die Pflanzen und deren Wurzeln ein aktives Bodenleben, welches wiederum einen fruchtbaren und krümeligen Boden bedingt.

Zwischenfrüchte durchwurzeln den Boden je nach Pflanzenart mehr oder weniger intensiv. Sie lockern den Boden und schaffen es sogar, verdichteten Boden (Verdichtungshorizonte) aufzubrechen und für eine ausgewogene Struktur von Grob-, Mittel- und Feinporen zu sorgen. Natürlich darf hier auch nicht auf die Regenwürmer vergessen werden, welche durch die organische Substanz der Zwischenfrüchte ideale Lebensbedingungen vorfinden. Sie tragen nämlich gemeinsam mit den Pflanzen für eine gute Durchlüftung des Bodens durch Grobporen bei. Außerdem bringen sie organische Substanz in den Boden ein und erzeugen dadurch sogenannte Ton-Humus-Komplexe, welche für eine stabile Bodenstruktur verantwortlich sind. Die Grobporen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Infiltrationskapazität des Bodens. Nur durch eine ausreichende Anzahl an Grobporen und Regenwurmgängen kann ein rasches Versickern des Wassers ermöglicht werden. Somit ist die Förderung der Bodenlebewesen durch den Anbau von Zwischenfrüchten und die sorgfältige Durchführung der Bodenbearbeitung für den Erhalt von Grobporen im Hinblick auf die Vermeidung der Erosion entscheidend (vgl. HAMPL, 1996, 15).

Die Bedeckung des Bodens schützt den Boden vor Verschlämmung. Die Pflanzen bewahren den Boden durch ihre Blattmasse vor Verschlämmung, da die Regentropfen, speziell bei einem Starkregen, von den Blättern aufgefangen und die Wucht des Aufpralls erheblich gesenkt wird. Die Reduzierung der Aufprallgeschwindigkeit verhindert also die Zerstörung der Bodenkrümel, wodurch der Abtransport von fruchtbarster Erde (Tonteilchen) unterbunden wird. Weiters ist auch die Höhe des Bestandes von entscheidender Bedeutung. Je höher der Pflanzenbestand ist, desto mehr Blattetagen sind vorhanden. Der Regen wird somit noch stärker gebremst, als wenn z.B. nur zwei Etagen vorliegen (vgl. HAMPL, 1996, 28).

Das Anlegen von Zwischenfrüchten hat auch eine Erhöhung bzw. Stabilisierung des Humusgehaltes im Boden zur Folge. Der Humus, der durch den Abbau der Zwischenfrüchte durch die Bodenlebewesen entsteht, liegt in einer leicht abbaubaren Form, dem sogenannten Nährhumus vor. Diese Humusform gewährleistet die Erzeugung einer guten Krümelstruktur und eine ausreichende Mineralisierung durch die Mikroorganismen (vgl. KASTENHUBER, 2008, 26).

2.3. Stickstoffkreislauf

Stickstoff hat eine ganz besondere Bedeutung unter den Nährstoffen. Der Gehalt an Stickstoff im Ausgangsgestein ist relativ gering. Stickstoff kommt daher beinahe ausschließlich aus der organischen Substanz und unterliegt vielfältigen Umsetzungsprozessen im Boden. Stickstoff ist ein für die Pflanzenernährung unerlässlicher Nährstoff und kann bei falscher Anwendung oder Überdüngung zu Schädigungen von Oberflächengewässern oder zur Verschmutzung des Trinkwassers führen.

Stickstoff liegt im Boden fast ausschließlich in organischer Bindung vor und ist somit nicht pflanzenverfügbar. Die Stickstoffgehalte in Böden schwanken je nach der Entwicklung unterschiedlich stark. Pflanzenverfügbarer Stickstoff im Boden liegt als anorganischer Anteil, in Form von Nitrat oder Ammonium vor. Nitrat ist leicht löslich und somit auch auswaschungsgefährdet. Bei Ammonium hingegen besteht diese Gefahr in der Regel nicht, allerdings ist der Gehalt im Boden geringer, da Ammonium zwar laufend bei der Ammonifikation entsteht, aber rasch durch nitrifizierende Bakterien zu Nitrat umgewandelt wird.

Die Stickstoffmineralisierung, welche auch Ammonifizierung genannt wird, wandelt den im Boden vorliegenden organisch gebundenen Stickstoff, zum Beispiel in Ernterückständen, zu anorganischen Ammonium-Ionen um. Diese Ammonium-Ionen können nun direkt von der Pflanze aufgenommen werden oder sie werden durch die Nitrifikation zu Nitrit und in weiterer Folge zu Nitrat umgewandelt. Nitrat ist die bevorzugte Stickstoffaufnahmeform der Pflanze, da dieses über den Massenfluss mit der Wurzel aufgenommen werden kann. Den umgekehrten Prozess der Stickstoffmineralisierung nennt man Immobilisierung. Hierbei wird Stickstoff zum Beispiel beim Abbau von Ernterückständen von den abbauenden Mikroorganismen aufgenommen, um Stoffe mit einem weiten Kohlenstoff/Stickstoffverhältnis, kurz C/N-Verhältnis, abbauen zu können. In weiterer Folge wird der Stickstoff bei erfolgter Einengung des C/N-Verhältnisses durch den mikrobiellen Abbau der Biomasse wieder frei. Das C/N-Verhältnis im Boden liegt in der Regel bei 20 : 1 und in Getreidestroh bei bis zu 120 : 1. Es muss eine Einengung des C/N-Verhältnisses erfolgen, damit das Getreidestroh rascher abgebaut werden kann. In der

landwirtschaftlichen Praxis empfiehlt sich daher zur Strohrotte bei Getreide eine Stickstoffdüngung, um der Gefahr einer Stickstoffimmobilisierung vorzubeugen.

Stickstoff kann im Boden aber nicht nur aus Ernterückständen gewonnen werden, sondern auch über den natürlichen Weg der Stickstoffbindung bestimmter Mikroorganismen oder über die Zuführung von Wirtschafts- oder Mineraldünger. Bei der symbiontischen Stickstofffixierung wird der Stickstoff aus der Luft gebunden und für die Pflanze zur Verfügung gestellt. Bestes Beispiel dafür sind die Leguminosen, welche über die Symbiose mit Knöllchenbakterien diesen Stickstoff binden, der für das Wachstum des Symbionten verbraucht wird und für die nachfolgenden Kulturen in Form abgestorbener Ernterückstände zur Verfügung steht.

In der intensiven Landbewirtschaftung hat die Zufuhr von Stickstoff und anderen Nährstoffen über Mineral- oder Wirtschaftsdünger die größte Bedeutung. Chemisch-synthetische Mineraldünger enthalten je nach Düngerform Ammonium-, Nitrat- oder Carbamidstickstoff. Wird Nitrat über solche Dünger in den Boden eingebracht, kann dieser sofort von den Pflanzen aufgenommen werden. Ammonium wird entweder auch sofort aufgenommen oder unterliegt der Nitrifikation und kann folglich als Nitrat aufgenommen werden. Carbamidstickstoff unterliegt im Boden mehreren Umwandlungsprozessen, wobei auch Ammonifikation und Nitrifikation für die Umwandlung die zentrale Rolle spielen. Ein carbamidstickstoffhaltiger Dünger ist zum Beispiel Harnstoff. Wirtschaftsdünger enthalten je nach Düngerform beziehungsweise Tiergattung unterschiedliche prozentuelle Anteile an organisch und anorganisch gebundenem Stickstoff. So liegt zum Beispiel bei Festmist der größte Anteil organisch gebunden vor und muss, wie die Ernterückstände im Boden, erst langsam abgebaut werden. Gülle als weiterer Vertreter der Wirtschaftsdünger enthält einen großen Stickstoffanteil in Form von Ammoniumstickstoff und ist somit rascher verfügbar, aber weniger lang anhaltend. Egal welche Düngerform, ob chemisch synthetisch oder hofeigener Dünger, auf eine pflanzenbezogene Anwendung unter Beachtung der Richtlinien für die sachgerechte Düngung ist unter allen Umständen Acht zu geben.

Stickstoff wird diesem Kreislauf allerdings nicht nur zugeführt, sondern geht auch über verschiedenste Wege verloren. So kann Stickstoff in Form von Nitrat oder Nitrit über die sogenannte Denitrifikation als elementarer Stickstoff oder Lachgas verloren gehen. Dieser Prozess findet vor allem bei einer Wassersättigung des Bodens und somit bei Luftmangel

statt. Bestimmte Bakteriengruppen im Boden sind hier in der Lage, bei Sauerstoffmangel den Nitrat- und Nitritsauerstoff als Elektronenakzeptor zu verwenden. Somit entstehen aus Nitrit und Nitrat durch die Abspaltung des Sauerstoffes gasförmige Produkte, welche in die Atmosphäre entweichen.

Neben elementarem Stickstoff und Lachgas kann auch Ammoniak gasförmig in die Atmosphäre entweichen. Dies tritt vor allem bei hohen pH-Werten im Boden und bei der Zuführung von Harnstoff oder Wirtschaftsdünger auf. Hier sollte auf eine möglichst rasche Einarbeitung des Düngers, sowie auf eine entsprechende Witterung nach der Ausbringung bei einer Kopfdüngung geachtet werden.

Stickstoffverluste treten aber nicht nur in Form von gasförmigen Emissionen auf, sondern es kann auch zu beachtlichen Verlusten in Richtung des Grundwassers kommen. Stickstoffauswaschung in tiefere Bodenschichten oder in das Grundwasser betrifft überwiegend den leicht auswaschbaren Nitratstickstoff, auf leichteren Böden auch teilweise Ammoniumstickstoff. Stickstoffauswaschung hängt hierbei von nicht beeinflussbaren Faktoren wie Klima- und Bodenverhältnissen, aber auch von beeinflussbaren Faktoren wie Düngungsintensität, Bodenbearbeitung oder Pflanzenbewuchs ab. Ist der Boden begrünt, können die Pflanzen den Stickstoff im Boden aufnehmen und speichern, wodurch weniger in Form von Auswaschung verloren geht. Eine angepasste Düngung zur Hauptkultur und die Anlage einer Zwischenfrucht können den Stickstoffgehalt im Boden deutlich reduzieren und somit der Gefahr einer Stickstoffauswaschung vorbeugen (vgl. LÜTKE ENTRUP, 1998, 270).

Die Höhe des Stickstoffaustrages aus dem Boden wird neben dem Vorhandensein einer Zwischenfrucht wesentlich durch die Sickerwassermenge beeinflusst. Intensive Niederschläge erhöhen die Sickerwassermenge. Wird eine Zwischenfrucht zeitgerecht nach der Hauptfrucht angelegt, kann der verbleibende Stickstoff in der Pflanzenbiomasse konserviert werden und es kommt zu keiner Verlagerung in tiefere Bodenschichten. Die Nährstoffe in der oberirdischen Biomasse stehen nach der erfolgten Mineralisierung der Nachfrucht zur Verfügung (vgl. BÖHM und HÖSCH, 2011, 6).

2.4. Gasförmige Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden

2.4.1. Lachgas (N_2O)

Distickstoffmonoxid ist ein farbloses, nicht toxisches Gas aus der Gruppe der Stickoxide. Besser bekannt ist das Gas Distickstoffmonoxid unter seinem Trivialnamen Lachgas. Die chemische Summenformel für das Lachgas ist N_2O (vgl. THOMSON et al., 2012, 1157).

Die durch den Menschen verursachten Lachgasemissionen betragen weltweit bis zu 80 %. Von diesem Anteil stammt ca. ein Drittel aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Bei der Schätzung dieses Wertes ergeben sich jedoch große Unsicherheiten. Vor allem jene Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden lassen sich aufgrund der hohen Komplexität bei der Lachgasbildung oftmals schwer abschätzen (vgl. MOTZ, 2003, 3). Verschiedenste Zahlen werden in der Literatur beschrieben. Die Berechnungen für diese Werte unterliegen häufigen Korrekturen. So findet man in älteren Berichten stark abweichende Werte im Gegensatz zu aktuellen. Als Beispiel sei hier angeführt, dass bei anderem Recherchematerial 68 % des emittierten Lachgases aus landwirtschaftlich genutzten Böden stammt (vgl. SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH, s.a., 3).

Lachgas ist am anthropogenen Treibhauseffekt mit rund 6 % beteiligt (vgl. SEHY, 2004, 5). Andere aktuellere Quellen beschreiben die Wirkung am Treibhauseffekt mit weniger als 8 %. Lachgas ist 300-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid. Darum wirken sich auch geringe Mengen auf das Klima aus. Die Lebenszeit des Lachgases in der Atmosphäre beläuft sich auf 114 Jahre (vgl. THOMSON, et al., 2012, 1157). Die Konzentration des Lachgases beträgt derzeit ca. 314 ppb. In vorindustrieller Zeit herrschte ein Wert von etwa 270 ppb vor. Folglich ist die Lachgaskonzentration um 16 % gestiegen, wobei sie jährlich um 0,8 ppb bzw. 0,25 % zunimmt. Lachgas ist einerseits wegen seiner Wirkung als Treibhausgas schädlich, andererseits spielt es eine Rolle bei der Zerstörung des stratosphärischen Ozons (vgl. SEHY, 2004, 5).

Das IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) ist eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie). Das IPPC hat eine Methode entwickelt, welche mit

einfachen Mitteln und bei fehlenden nationalen Statistiken die Abschätzung der Lachgasemissionen ermöglicht. Das Ziel ist, dass jeder Staat in Europa diese Methode für die Berechnung der Lachgasemissionen verwenden kann. Selbstverständlich muss auf eine Adaptierung an die nationalen Gegebenheiten bei der Berechnung, welche doch gerade im Bezug auf die Landwirtschaft starken Schwankungen unterliegt, Rücksicht genommen werden. Die europäischen Staaten sind deshalb aufgefordert die IPPC- Methode entsprechend für ihr Land anzupassen, jedoch muss eine vorgenommene Änderung gut begründet und dokumentiert sein (vgl. SCHMID et al., 2000, 61). Die Aufstellung der einzelnen Quellen und Senken des Lachgases wird als Lachgasinventar bezeichnet.

Entstehung des Lachgases in der Landwirtschaft

Die Bildung des Lachgases wird primär durch die Nitrifikation und die Denitrifikation hervorgerufen. Die Chemodenitrifikation, dissimilatorische Reduktion von Nitrat zu Ammonium und die assimilatorische Nitratreduktion spielen als Lachgasproduzenten eine geringe Rolle, wobei von diesen drei Prozessen die Chemodenitrifikation am meisten die Entstehung des Lachgases begünstigt.

Die Nitrifikation ist die oxidative Umsetzung von Ammonium zu Nitrat, die vor allem von aeroben und chemoautotrophen Bakterien durchgeführt wird. Bei der Nitrifikation wird Ammonium durch Nitrosomonas zu Nitrit umgewandelt. Im Anschluss wird Nitrit von Nitrobacter zu Nitrat umgesetzt. Als Nebenprodukt bei der Ammoniumoxidation kann die Entstehung des Lachgases unter aeroben Bedingungen auftreten. Lachgas wird hier vielleicht aus Gründen der Vermeidung der Anreicherung des Zelltoxines Nitrit erzeugt. Des Weiteren wird Lachgas bei der Nitritreduktion produziert. Autotrophe Ammonium-Oxidierer können Lachgas sowohl oxidativ als auch reduktiv erzeugen. Aber auch heterotrophe Bakterien und Pilze können organisch gebundenen Stickstoff zu Nitrat umwandeln. Hier kann als Nebenprodukt Lachgas entstehen. Dies kann vielfach in Böden mit geringen pH-Werten und hohen Gehalten an organischer Substanz auftreten (vgl. KAMP, 1998, 9).

Die Nitrifikation wird durch hohe Temperaturen und eine gute Sauerstoffversorgung gefördert. Wahrscheinlich wird bei Sauerstoffmangel Nitrit als Sauerstoffquelle für die

Oxidation von Ammonium herangezogen, wobei Lachgas entsteht. Meist wird jedoch deutlich weniger als 1 % des umgesetzten Stickstoffes als Lachgas ausgestoßen (vgl. SCHMID et al., 2000, 52).

Bei der Denitrifikation werden Nitrit und Nitrat reduziert. Es ist ein heterotropher Prozess. Meistens sind bei der Reduktion fakultativ anaerobe Organismen beteiligt. Sie verwenden bei Sauerstoffmangel den Sauerstoff des Nitrits bzw. Nitrats statt dem elementaren Sauerstoff als Elektronenakzeptor. Bei der Denitrifikation gibt es eine Kette von Zwischenschritten und Zwischenprodukten. Ein Zwischenprodukt ist das Lachgas. Die verschiedenen Arten der Mikroorganismen bilden jedoch unterschiedliche Mengen an Zwischenprodukten. So produziert eine Art mehr N_2O , die andere wiederum mehr N_2 (vgl. KAMP, 1998, 9).

Die Denitrifikation tritt nur dann auf, wenn fast kein Sauerstoff mehr im Boden ist. Sie ist wie die Gärung im Zellstoffwechsel, welche auch unter anaeroben Bedingungen stattfindet, energetisch schlechter als die Oxidation mit Sauerstoff. Vor allem dann, wenn im Inneren von Bodenaggregaten genügend Nitrat und organisches Material vorhanden sind, die Temperatur nicht zu tief ist und ein hoher Bodenwassergehalt vorliegt der die Diffusion von Sauerstoff behindert, findet der Prozess der Denitrifikation beste Voraussetzungen vor. Wie schon erwähnt ist Lachgas ein Zwischenprodukt der Denitrifikation. Die Höhe des Lachgasanteiles wird vor allem dann begünstigt, wenn die Denitrifikation nicht vollständig bis zum Schluss durchlaufen werden kann und kein elementarer Stickstoff (N_2) am Ende vorliegt. Da das Lachgas gasförmig ist, kann es bei ungünstigen Bedingungen nicht weiter denitrifiziert werden und diffundiert aus dem Boden in die Atmosphäre. Hohe Nitratkonzentrationen (Reduktion von Nitrat gegenüber der von Lachgas wird bevorzugt; Nitrat ist im Überschuss vorhanden) begünstigen die Bildung des Lachgases. Der Grund für die Konkurrenz zwischen Nitrat und Lachgas ist jener, dass diese beiden Substanzen von den gleichen Enzymen reduziert werden. Folglich schwankt der Lachgasanteil bei der Denitrifikation nicht nur aufgrund der äußeren Einflüsse, (Temperatur, Bodenwassergehalt und Nitratkonzentration) sondern auch aufgrund der Zusammensetzung der Bakterienpopulationen. Der pH-Wert spielt auch bei der Denitrifikation eine Rolle, jedoch weiß man über seinen Einfluss im Bezug auf die Bildung von Lachgas im Detail nicht Bescheid, da keine eindeutigen Messergebnisse vorliegen.

Im Gegensatz zur Nitrifikation wird bei der Denitrifikation Lachgas nicht nur produziert, sondern auch verbraucht. Sie dient somit als Senke für das Lachgas, jedoch nur dann, wenn wenig Nitrat im Boden vorhanden ist (vgl. SCHMID et al., 2000, 51).

Die jeweiligen Anteile des Lachgases aus der Nitri- und Denitrifikation sind nicht einfach festzustellen. Die Unterscheidungsmöglichkeit zwischen den Anteilen beruht auf einer Messmethode, bei der die Nitrifikation mit Acetylen unterdrückt wird und dadurch kein Lachgas aus der Nitrifikation entstehen kann. Acetylen bewirkt jedoch eine Veränderung der physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse im Boden. Es verhindert die Bildung des Nitrats, welches im Zuge der Nitrifikation gebildet werden würde. Somit wird auch den Denitrifikanten die Nahrungsquelle weggenommen. Die Widersprüchlichkeit dieser Messmethode ist groß, da die Unterschiede in den Resultaten auch auf die natürliche Variabilität bzw. auch auf den Einfluss dieser Messmethode auf den Boden zurückgeführt werden können.

In den meisten Untersuchungen zeigte sich aber, dass kurz andauernde Lachgasemissionen nach Niederschlägen fast ausschließlich der Denitrifikation zuzuordnen sind. Die Lachgasemissionen aus der Nitrifikation treten jedoch niedrig, dafür aber kontinuierlich auf. In eher feuchten Böden dürfte daher der Hauptteil an Lachgas aus der Denitrifikation stammen, wogegen in trockenen Böden die Nitrifikation die Hauptquelle für die Lachgasbildung darstellt (vgl. SCHMID et al., 2000, 53).

Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden

Landwirtschaftlich genutzte Böden sind sowohl gut mit organischem, als auch anorganischem Stickstoff versorgt. Der organische Stickstoff ist in der Biomasse gespeichert. Bei der Zersetzung des Pflanzenmaterials wird aber nicht nur Stickstoff, sondern auch Kohlenstoff freigesetzt. Diese Stoffe (Stickstoff und Kohlenstoff) sind die Ausgangsstoffe für die Nitri- und Denitrifikation. Sie sind in den Böden reichlich vorhanden. So tritt vor allem nach dem Ausbringen von Düngern einige Tage lang sehr viel Lachgas aus, wobei Wirtschaftsdünger aufgrund seines Anteiles an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) mehr zur Lachgasbildung beiträgt als Handelsdünger (vgl. SCHMID et al., 2000, 53). Die

Lachgasemissionen treten bei viehhaltenden Betrieben aufgrund von hohen N-Bilanzen verstärkt auf. In reinen Ackerbauregionen sind bei bedarfsgerechter Düngung hingegen nur sehr niedrige Emissionen zu verzeichnen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass rund 1,5 % des gedüngten Stickstoffes direkt bzw. indirekt als Lachgas emittiert. In anderen Publikationen sind wiederum Werte von mehr als 3 % nachzulesen (vgl. SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH, s.a., 8).

Bei den mineralischen Düngemitteln gast Kalkammonsalpeter (KAS) mehr Lachgas aus als reiner Ammoniumdünger. Vor allem ein Ammoniumdünger mit einem Nitrifikationshemmer reduziert die Lachgasbildung deutlich (vgl. LEICK, 2003, 94). Harnstoff schneidet bei der Bildung von Lachgas am besten ab, Kalkammonsalpeter hingegen am schlechtesten. Harnstoff muss bei der Zersetzung den Schritt der Hydrolyse (Spaltung) durchlaufen, bevor überhaupt durch die Nitrifikation Nitrat gebildet werden kann, welches für die N_2O -Produktion zur Verfügung stehen muss.

Um einen Dünger im Hinblick auf die Klimarelevanz beurteilen zu können, ist es nötig den CO_2 -Fußabdruck des jeweiligen Düngers zu berechnen und ihn anschließend mit anderen Düngern zu vergleichen. Lachgas und Methan sind stärker klimaschädlich als Kohlendioxid, Lachgas etwa 300-mal. Lachgas und Methan müssen daher mit einem entsprechenden Faktor (bei Lachgas 300) multipliziert werden, um als CO_2 -Äquivalente in die Berechnung des CO_2 -Fußabdruckes einfließen zu können. Die Untersuchungen haben ein klares Ergebnis gebracht. Kalkammonsalpeter schneidet auch hier am schlechtesten ab, wogegen Harnstoff mit einem Nitrifikationshemmer den geringsten CO_2 -Fußabdruck aufweist. Harnstoff ohne Nitrifikationshemmer steht dazwischen. Harnstoff mit einem Nitrifikationshemmer weist einen knapp um die Hälfte niedrigeren CO_2 -Fußabdruck auf, als ein herkömmlicher Kalkammonsalpeter. Für Deutschland soll sich somit eine Reduktion des Lachgases von bis zu 50 % ergeben. Andere Studien haben sogar eine Reduktion des Lachgases mit 60 % beim Einsatz eines Nitrifikationshemmers beschrieben. Ganzjahresmessungen sind zu dem Ergebnis gekommen, dass die positiven Effekte des Nitrifikationshemmers bis in den Winter wirken und eine tatsächliche Verringerung der Emissionen bewirkt. Es passiert hier also eine wirkliche Senkung der Lachgasemissionen und nicht bloß eine verzögerte Ausgasung. Außerdem können die einzelnen Gaben bei der Ausbringung erhöht, beziehungsweise die Anzahl der Gaben reduziert werden, von drei auf zum Beispiel zwei Gaben. Somit birgt die

Verwendung von Nitrifikationshemmern bei Harnstoff auch arbeitswirtschaftliche Vorteile in sich.

Die Reduktion der Emissionen durch Nitrifikationshemmer führt sogar bei der Gülle zu einem Rückgang der Lachgasemissionen. Es wurden anhaltend hohe Ammoniumwerte und eine verzögerte Nitratbildung beobachtet, wobei eine Reduktion der Emissionen durch den Einsatz von Nitrifikationshemmern von 75 % verzeichnet werden konnte (vgl. SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH, s.a., 10).

Die gedüngte Stickstoffmenge (N-Input) hat jedoch den bedeutendsten Einfluss auf die Lachgasbildung im Gegensatz zur Düngerform. Dies sollte berücksichtigt werden, denn ein Boden, der sehr gut oder zu viel mit Stickstoff versorgt ist, emittiert mehr Lachgas. Weltweit betrachtet sind das Klima und die verschiedenen Bodenparameter (z.B. Bodentemperatur), sowie die Landnutzungsform die Hauptfaktoren für die Lachgaserzeugung. In den Tropen wird viel mehr Lachgas produziert als in den gemäßigten Breiten, da die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur konstant hoch sind. Selbstverständlich bewirkt eine Nutzungsänderung (Wiesenumbruch) eine hohe Lachgasproduktion, da viel Kohlenstoff und Stickstoff durch den Abbau der organischen Substanz schlagartig vorhanden ist.

Somit kann gefolgert werden, dass hohe Lachgasemissionen aus Acker- oder Grünlandböden auftreten bei:

- Stickstoffüberschüssen
- Gemeinsamer Ausbringung von Handels- und Wirtschaftsdüngern (mehr Kohlenstoff vorhanden)
- Steigenden Nitratgehalten

Hier muss allerdings bedacht werden, dass eine Stickstoffdüngung zwangsläufig nicht mit den Emissionen von Lachgas als alleinige Ursache in Verbindung gebracht werden darf. Die Menge des Stickstoffes, welche durch Lachgas abhandenkommt, wird vor allem durch die folgenden Parameter beeinflusst:

- **Menge an leicht verfügbarem Mineral-N im Boden:** Hohe Nitratgehalte erhöhen die Lachgasbildung; bzw. gleichzeitige Düngung von Handels- und Wirtschaftsdüngern.
- **Vorhandensein organischer Substanz:** Mikroorganismen leben vom Kohlenstoff, der durch Ernterückstände und Wirtschaftsdüngerausbringung vorhanden ist.
- **Bodenklima:** eine hohe Wassersättigung verbunden mit Sauerstoffmangel, Frost- und Tauperioden bewirkt hohe Emissionen. Generell fördert ein feuchtwarmes Klima die Produktion (vgl. SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH, s.a., 4).
- **Fruchtfolge:** Maisanbau fördert aufgrund hoher N-Düngung die Lachgasbildung; beim Vergleich zwischen Leguminosen und Nichtleguminosen gibt es bis jetzt noch keine eindeutigen Aussagen; das C/N-Verhältnis hat auch Einfluss auf die Lachgasbildung, wobei die Angaben zwischen einem hohen und einem niedrigen C/N-Verhältnis im Bezug auf Ernterückstände und die bei der Zersetzung einhergehende Lachgasbildungs menge nicht eindeutig sind (vgl. MOTZ, 2003, 27).
- **Bodenbearbeitung:** Es wurden keine signifikanten Unterschiede bei der Verwendung der Kreiselegge und des Pfluges festgestellt. Trotz dessen lässt sich eine Tendenz verfolgen, dass sich eine pfluglose Bearbeitung steigend auf die Nitri- und Denitrifikationsrate auswirkt und folglich die Menge an emittiertem Lachgas steigt. Eine pfluglose Bearbeitung führt zu vielfachen Veränderungen der Bodeneigenschaften (z.B. höherer C-Gehalt in den oberen Bodenschichten, erhöhte Anzahl an Mikroorganismen, erhöhte Bodendichte, geringeres luftgefülltes Porenvolumen, höherer Ammonium-, Nitrat- und Gesamtstickstoffgehalt, höhere Bodenfeuchte und pH-Wert). Diese Eigenschaften sind für eine erhöhte Lachgasemission verantwortlich (vgl. MOTZ, 2003, 30).
- **Bodenverdichtung:** durch zunehmende Maschinengrößen stieg auch das Gewicht der Maschinen, was zur Verdichtung des Bodens führte. Die Bodenverdichtung schädigt die biologische Aktivität, stört die Drainagefähigkeit (geringere Infiltrationskapazität) und beeinträchtigt das Pflanzenwachstum. Ein verdichteter Boden weist im Gegensatz zu einem „gesunden“ eine verringerte Porosität, einen höheren Gehalt an denitrifizierenden Bakterien und einen höheren Kohlenstoffgehalt in den obersten Bodenschichten auf. Diese Faktoren führen zu einer größeren Denitrifikationsrate und folglich zu einer Steigerung der Lachgasemissionen. Andere Publikationen haben

jedoch keinen Zusammenhang zwischen einer Bodenverdichtung und einer Erhöhung der Lachgasemissionen gefunden (vgl. MOTZ, 2003, 32).

- **Düngung:** (siehe oben) (vgl. MOTZ, 2003, 35).

Wie schon oben beschrieben sind nach größeren Regenmengen erhöhte Lachgasemissionen zu beobachten, da die Poren mit Wasser anstatt mit Luft gefüllt sind und der Sauerstoffgehalt daher im Boden sehr niedrig ist. Die Denitrifikation findet somit beste Bedingungen vor. Ergänzend zu den oben beschriebenen Parametern muss auch noch die Lachgasbildung auf Weiden berücksichtigt werden. Der Urin der Tiere besteht aus Wasser und Stickstoff, womit beste Voraussetzungen für die Denitrifikation vorhanden sind, wenn dieser in den Boden versickert. Außer Acht darf auch nicht die zusätzliche Bodenverdichtung durch das weidende Vieh gelassen werden. Weiters wurde der Lachgasaustausch zwischen dem Boden und der Pflanze untersucht. Man hat festgestellt, dass Pflanzen den Austausch fördern oder sogar selbst Lachgas produzieren können (vgl. SCHMID et al., 2000, 53).

Bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern kann Lachgas entstehen. Sehr gute Bedingungen für die Entstehung von Lachgas sind beim Mist vorhanden, da ein hoher Kohlenstoffanteil durch das Stroh vorhanden ist. Bei der Gülle hingegen läuft die Denitrifikation vollständig ab, wobei als Endprodukt unschädlicher elementarer Stickstoff (N_2) entsteht. Auszuschließen ist aber nicht, ob die niedrigeren Lachgasemissionen der Gülle bei der Lagerung nicht durch höhere Emissionen beim Ausbringen ausgeglichen werden (vgl. SCHMID et al., 2000, 53).

Laut einer anderen Quelle können jedoch die N_2O -Emissionen durch Behandlung der Dünger reduziert werden. Die Ausgasungen bei Rinderfestmist können durch eine aerobe Festmistkompostierung deutlich gesenkt werden. Wichtig bei der Kompostierung ist eine gute Sauerstoffversorgung, ausreichendes Strukturmaterial und vor allem ein geregelter Kompostierungsverlauf. Aussagen über Reduktionsmöglichkeiten des Lachgases bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern können aufgrund des zu geringen Forschungsstandes nur unter Vorbehalt getroffen werden (vgl. HACKL und SCHLEICHER, 2000, 15).

Zu erwähnen sind auch noch die indirekten Verluste des Stickstoffes durch Ammoniak oder Nitrat aus der Landwirtschaft. Ammoniak wird durch Deposition in Gewässer eingetragen und führt dort zu erhöhten Lachgasemissionen. Nitrat wird aus dem Boden ausgewaschen und gelangt ins Grundwasser oder in angrenzende Gewässer und bewirkt ebenfalls erhöhte

Lachgasemissionen. Jedoch ist es äußerst schwer festzustellen, wie hoch der Anteil der Lachgasemissionen ist, der durch den verlorengegangenen Stickstoff aus der Landwirtschaft stammt (vgl. SCHMID et al., 2000, 54).

Verstärkte Emissionen durch Frier- und Tauzyklen

Die Lachgasbildung wird stark vom DOC-Gehalt (gelöster organischer Kohlenstoff), vom Bodenwassergehalt und von der Temperatur beeinflusst. Die Lufttemperatur wirkt sich dabei auf die Bodentemperatur aus. Optimale Bedingungen findet die Nitrifikation zwischen 25 und 35°C vor. Die Denitrifikation hingegen fängt bereits bei -2°C an. Für eine nennenswerte Denitrifikation bedarf es allerdings Temperaturen von mehr als 5°C. Die Denitrifikationsrate sinkt mit abnehmenden Temperaturen, wobei sich gleichzeitig das $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ -Verhältnis vergrößert. Bei niedrigen Temperaturen wird deshalb mehr Lachgas im Verhältnis zu elementarem Stickstoff gebildet.

Die physikalischen Eigenschaften, wie Diffusion und Löslichkeit des Lachgases werden ebenfalls durch die Temperatur verändert. Die Diffusion steigt mit zunehmender Temperatur, wogegen die Löslichkeit des Lachgases in Wasser mit sinkender Temperatur steigt.

Die Temperatur hat also Einfluss auf die biologischen Faktoren durch die Bildung von Lachgas (Nitri- und Denitrifikation). Die Einwirkung der Temperatur auf die physikalischen Eigenschaften wirkt sich auf die Abgabe des Lachgases an die Bodenoberfläche aus (Löslichkeit und Diffusionsgeschwindigkeit).

Wie schon oben beschrieben treten hohe Lachgasemissionen vor allem nach stärkerem Regen und nach einer Düngung auf. Die größte Menge an Emissionen entweicht allerdings in der vegetationsfreien Periode während des Winters bei bzw. nach Frost- und Tauperioden (vgl. PETERSEN et al., 2011, 7). Es wird davon ausgegangen, dass ca. 50 % oder sogar mehr der jährlichen Emissionen während dieser Zeit in Deutschland stattfinden. Hohe Ausgasungen konnten auch bei Temperaturen um 0°C, beim Auftauen des Bodens festgestellt werden. Aber auch auf ungefrorenem Boden mit einer Schneedecke konnten hohe N_2O -Emissionen verzeichnet werden. Die Emissionen belaufen sich allerdings nur auf

eine kurze Zeitdauer von wenigen Tagen. Es spielen hier biologische und physikalische Prozesse eine Rolle. Durch den Frost stirbt ein Teil der Mikroorganismen ab, was beim Auftauen eine N-Quelle darstellt. Der Boden erfährt während des Gefrierens und Tauens eine Quellung und eine Schrumpfung (Aggregatzerstörung), wobei Kohlenstoff freigesetzt wird. Bei diesem Prozess ist hauptsächlich die Denitrifikation beteiligt, welche auch unter 0°C stattfindet. Beim Auftauen ist die oberste Bodenschicht wassergesättigt und die darunterliegende noch gefroren. Wenn die aufgetaute obere Schicht Nitrat enthält, wird dieses sofort in der Denitrifikation denitrifiziert, wobei Lachgas entsteht (vgl. LEICK, 2003, 106).

Kleinräumige anaerobe Bereiche (Microsites), können vor allem dann entstehen, wenn der Boden kompakte Eisschichten aufweist. Dadurch kann der Sauerstoff nicht in den Boden gelangen (Sperrschicht), wodurch die Denitrifikation beste Bedingungen vorfindet (vgl. LEICK, 2003, 108). Der durch den Frost freigesetzte Kohlenstoff reduziert den Sauerstoffgehalt durch die Mikroorganismenaktivität. Außerdem ist die Sauerstoffnachlieferung aufgrund des oftmals hohen Wassergehaltes des Bodens in dieser Jahreszeit beeinträchtigt (vgl. SEHY, 2004, 13).

Weiters entsteht Lachgas in den unteren Bodenschichten, wenn die oberen gefroren sind. Durch die Eisschicht kann das sich bildende N_2O nicht entweichen und wird schlagartig beim Auftauen freigesetzt. Wie schon erwähnt trägt DOC und Nitrat, aber auch Ammonium zur Bildung des Lachgases bei. So konnten nach der Einarbeitung von Ernterückständen, aber auch von Begrünungen und organischen Düngern erhöhte Emissionen nach einem Frost verzeichnet werden. Allerdings muss beachtet werden, dass ein Boden mit Pflanzenbestand später gefriert als ein unbewachsener Boden. Aber auch die Eindringtiefe des Frostes ist bei einem Boden mit Pflanzenbewuchs nicht so tief.

Die Messung des Lachgases ist in dieser Zeitspanne also überaus wichtig. Nur so können Aussagen über die tatsächlichen Auswirkungen, Mengen und über die Einflüsse auf die Bildung des Lachgases getroffen werden, da in diesen wenigen Monaten ca. 50 % und mehr des jährlichen Lachgases emittiert werden (vgl. LEICK, 2003, 106).

Lachgasemissionen während des Tages

Die Temperatur hat auf die Lachgasbildung einen entscheidenden Einfluss. So konnten hohe Emissionswerte am Nachmittag bis zum frühen Abend beobachtet werden. Am Morgen hingegen wurden sehr geringe Emissionen gemessen. Darum ist es wichtig, mehrere Messungen während des Tages durchzuführen, da man sonst eine Messung entweder unterschätzen (am Morgen) bzw. überschätzen (am Abend) würde.

Die Ursachen für die Schwankungen während des Tages könnten durch die verstärkte Abgabe von Kohlenhydraten über die Pflanzenwurzel zu erklären sein, die bei mittleren bis höheren Temperaturen besser funktioniert als bei niedrigen oder zu hohen. Die Höhe der Kohlenhydratproduktion hängt von der Photosyntheseleistung ab, welche wiederum auf die Strahlungshöhe zurückgeführt werden kann. Durch die bei höheren Temperaturen einhergehende verstärkte Wurzelatmung und Mikroorganismenaktivität (veratmen C-haltiger Verbindungen-Exsudate) kann es zu einer Sauerstoffverarmung kommen, die die Lachgasbildung induziert. Bei Wassermangel wird dieser Prozess unterbrochen, da die Pflanze ihre Spaltöffnungen schließt und somit keine Photosynthese und Kohlenhydraterzeugung mehr stattfinden kann (vgl. LEICK, 2003, 110).

Zeitliche und räumliche Variabilität der Lachgasemissionen

Der Einfluss der zeitlichen und räumlichen Variabilität auf die Lachgasbildung ist vor allem bei der Messung problematisch. Um eine Aussage über die tatsächlichen jährlichen Lachgasemissionen treffen zu können, müssten sehr viele Messungen über einige Jahre hinweg durchgeführt werden. Darum wäre es notwendig, mindestens zweimal täglich über Jahre hinweg zu messen und dies auch an verschiedenen Standorten bzw. auf einem Feld an mehreren Stellen. Dies bedeutet allerdings einen extrem hohen und teuren Messaufwand. Dies ist auch der Hauptgrund für die Begrenzung der Messungen auf einige Monate oder Wochen. Somit kann die jährliche Ausgasung nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Trotzdem können aber durch viele Messungen Abschätzungen über die Dynamik der Lachgasemissionen getroffen werden. So treten Emissionsspitzen nach Frost- und Tauperioden, Regenereignissen, Düngung und Bodenbearbeitung auf. Diese Spitzen

beschränken sich in Summe auf wenige Tage bzw. Wochen. Somit kann auch mit wenigen Messungen eine Annäherung an die Gesamtemissionen errechnet werden.

Die räumliche Variabilität beschreibt im Gegensatz zur zeitlichen die Unterschiede bei den Messungen an verschiedenen Punkten auf dem gleichen Standort oder auf verschiedenen Feldern. So ergeben sich teilweise Unterschiede in den Variationskoeffizienten zwischen den einzelnen Messpunkten von 100 %. In anderen Literaturquellen sind Variationskoeffizienten bis zu 300 % beschrieben. Die Messwerte sind daher statistisch schief verteilt, was bedeutet, dass einige hohe Messwerte vielen tiefen gegenüberstehen.

Folglich haben die zeitliche und die räumliche Variabilität einen maßgeblichen Einfluss auf die tatsächlichen Werte der Lachgasemissionen. Eine zuverlässige Abschätzung der Emissionen wäre nur durch „gewaltige“ Messreihen über Jahre möglich (vgl. SCHMID et al., 2000, 57).

Maßnahmen zur Senkung der landwirtschaftlichen Lachgasemissionen:

- Lagerung des Wirtschaftsdüngers in Form von Gülle anstatt von Mist
- Aufteilung der Düngung auf mehrere Gaben
- Anpassung der Düngerform an die Witterungsbedingungen
- Verminderung der Stickstoffüberschüsse bei der Fütterung
- Erhöhung des Leguminosenanteiles (reduziert den Einsatz von Düngern)
- Vermeidung der Bodenverdichtung
- Ausbringungstechnik bei Gülle
- Nitrifikationsinhibitoren

Diese Möglichkeiten einer Reduktion sind ausschließlich auf die Verringerung der Lachgasemissionen bezogen. Sie stehen aber im Widerspruch zu anderen Bereichen der Landwirtschaft, wodurch hier Interessenskonflikte entstehen. Die Verbesserung eines Faktors wirkt sich fast immer negativ auf zumindest einen, meistens jedoch auf mehrere Faktoren aus. Daher müssen im Bezug auf die Möglichkeiten der Senkung des Lachgases aus landwirtschaftlichen Quellen unbedingt verschiedene Aspekte mitberücksichtigt werden, wie z.B.:

- Emissionen anderer Treibhausgase (Methan und Kohlendioxid)

- Ammoniakemissionen
- Nitratauswaschung
- Tierschutz
- Auswirkung auf die Biodiversität
- Andere Umweltwirkungen (vgl. SCHMID et al., 2000, 97)

Allerdings müssen jedoch die Produktionsbedingungen für eine zeitgemäße Landwirtschaft bei der Beachtung dieser Faktoren in Betracht gezogen werden. Die oben beschriebenen Interessenskonflikte dürfen nicht zu stark und die Widersprüche nicht zu groß sein. Bei den oben genannten Faktoren treten daher möglicherweise Gegensätzlichkeiten zwischen einem sachgerechten Pflanzenbau, Umwelt- und Tierschutz und einer Reduktion der Lachgasemissionen auf. Diese Zwiespältigkeit gilt es daher durch zusätzliche Forschungen zu überwinden und mögliche Lösungsmöglichkeiten und Vorschläge zu entwickeln. Der derzeitige Stand der Forschung lässt daher noch nicht endgültige Schlüsse im Hinblick auf die Senkung der N₂O-Emissionen zu. Allerdings hat die Verringerung der Stickstoffüberschüsse als unbestrittene Maßnahme auch bei derzeitigem Forschungsstand Gültigkeit. Außerdem müssen die Methoden zur effizienten Nutzung des Stickstoffes in der Landwirtschaft verbessert werden, damit die Stickstoffverluste möglichst gering sind (vgl. SCHMID et al., 2000, 98).

Ausblick

Da die Weltbevölkerung stetig wächst und dadurch auch in den Entwicklungs- und Schwellenländern die Landwirtschaft intensiviert wird, werden die Lachgasemissionen steigen. Vor allem die Nachfrage nach Fleisch wird in den kommenden Jahren stark ansteigen, was auch wiederum zu steigenden Lachgasemissionen führen wird. Aber auch die Methan- und Kohlendioxidemissionen werden dadurch weiter ansteigen. In Europa konnte dank der Umweltmaßnahmen in der Landwirtschaft der Mineraldüngerverbrauch reduziert werden. Trotz abnehmender Nutztierzahlen konnte die Nahrungsmittelproduktion aufgrund der steigenden Leistungsfähigkeit der Tiere konstant gehalten werden. Somit könnten die Stickstoffflüsse in den west- und mitteleuropäischen Ländern gesenkt werden, ohne dabei

die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln zu gefährden. Die europäische Landwirtschaft konnte damit einerseits die Lachgasemissionen durch die Verringerung der Stickstoffflüsse reduzieren, andererseits unerwünschte Nebenwirkungen wie etwa die Eutrophierung der Gewässer senken bzw. vermeiden (vgl. SCHMID et al., 2000, 96).

2.4.2. Kohlendioxid (CO₂)

Das Kohlendioxid (CO₂) hat mit 380 ppm eine im Vergleich zum Methan und Lachgas sehr hohe Konzentration in der Atmosphäre. Das Treibhauspotenzial des Kohlendioxides ist aber deutlich geringer, als jenes des Lachgases und des Methans. Allerdings ist die Konzentration des Kohlendioxides in der Atmosphäre höher, wodurch es mit mehr als 60 % am anthropogenen Treibhauseffekt beteiligt ist. Der Konzentrationsanstieg pro Jahr liegt derzeit bei 0,4 % (vgl. GOLLNOW, 2008, 6).

Seit Anbeginn der Industrialisierung ist der CO₂-Gehalt von 280 ppm auf ca. 380 ppm im Jahr 2005 gestiegen. Durch das Verbrennen vor allem fossiler Energieträger ist der Kohlendioxidgehalt in den letzten Jahrzehnten massiv gestiegen. Aber auch durch die Veränderungen in der Landwirtschaft in den vergangenen Jahrzehnten, z.B. durch Änderung der Landnutzung, wurde der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre erhöht. Die Landwirtschaft hat aber trotz der vielen Veränderungen bezüglich der Landnutzung nur einen geringen Anteil an der Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes (vgl. MESSNER, 2010, 3).

Es muss jedoch der Energieeinsatz in Form fossiler Energien für die Erzeugung von Dünge- und Futtermitteln beachtet werden. Derzeit spielt wie schon erwähnt die Landnutzungsänderung noch nicht die größte Rolle hinsichtlich des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre, wobei vor allem in nicht industrialisierten Ländern durch Landnutzungsänderungen vermehrt Humus in den Böden abgebaut und Kohlendioxid freigesetzt wird. Dazu trägt hauptsächlich die Abholzung der Regenwälder und deren Überführung in Weide- oder Ackerland bei. So ist z.B. Indonesien durch seine Regenwaldabholzungen für die Anlage von Palmölplantagen nach den USA und China der drittgrößte Kohlendioxidemittent der Welt. Durch die Intensivierung der Landwirtschaft und die Verwendung von Handelsdünger anstatt organischer Düngemittel sank der Humusgehalt in den Böden. Bei der Mineralisierung wird der Humus abgebaut, wodurch Kohlendioxid gebildet und freigesetzt wird (vgl. GOLLNOW, 2008, 6).

Kohlenstoff ist allerdings nicht nur im Boden, sondern auch in der Atmosphäre und in Ozeanen vorhanden bzw. gespeichert, wobei die Böden und Ozeane als Quellen und Senken für Kohlenstoff dienen. Die Kohlendioxidemissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden werden durch die Bodenatmung verursacht. Die Bodenatmung findet aufgrund der Atmung

der Wurzeln und des Abbaues organischer Substanz durch die Mikro- und Makroorganismen statt, wodurch ebenfalls CO₂ gebildet wird (vgl. MESSNER, 2010, 3).

Die Bodentemperatur und der Bodenwassergehalt sind zwei Faktoren, die einen großen Einfluss auf die Bodenatmung haben. Außerdem folgt die Bodenatmung einem Tages- und Jahresgang. In der Vegetationsperiode können die höchsten Kohlendioxidemissionen verzeichnet werden, da die Wurzelatmung und die Aktivität der Mikroorganismen in diesem Zeitraum am größten ist. Da das Wasser und die Temperatur im Frühjahr meistens nicht die begrenzenden Faktoren sind, ist in dieser Jahreszeit in der gemäßigten Klimazone die Bodenatmung bzw. die Entstehung des Kohlendioxides am stärksten ausgeprägt. Im Winter ist die Temperatur der limitierende Faktor, wogegen im Sommer der Bodenwassergehalt die Bildung der CO₂-Emissionen einschränkt. Nach den höchsten Emissionen im Frühling folgen der Sommer, der Herbst und zum Schluss der Winter.

Da die Temperatur Einfluss auf die Mikroorganismenaktivität hat, können sogar Temperaturschwankungen an einem Tag Auswirkungen hervorrufen. Der Bodenwassergehalt kann zum Ausgleich der Kohlendioxidemissionen im Tages- und Nachtverlauf durch die Wärmekapazität des Wassers führen.

Des Weiteren wirkt die Porenverteilung des Bodens auf die Bodenatmung ein, wodurch sich eine räumliche Variabilität der Kohlendioxidemissionen ergibt (vgl. MESSNER, 2010, 17).

Da der Bodenwassergehalt genauso wie die Temperatur die Mikroorganismenaktivität beeinflusst, hat er Auswirkungen auf die Kohlendioxidemissionen. Mit der Zunahme des Wassergehaltes im Boden bis zu einem Maximum kann eine Steigerung der Emissionen festgestellt werden. Bei einer weiteren Erhöhung des Bodenwassergehaltes über das Maximum hinaus kann nur noch eine Abnahme der Emissionen verzeichnet werden, da hier der Sauerstoff limitierend wirkt. Sehr hohe Kohlendioxidemissionen lassen sich nach einer Trockenheit, die von einem Niederschlagsereignis abgelöst wird, beobachten. Die hohen Emissionen sind auf die Verdrängung des Kohlendioxides in den Poren durch das eindringende Wasser und durch die sich im latenten Stadium befindlichen Organismen zurückzuführen. So konnte eine Steigerung von 48 bis 144 % verzeichnet werden. Auch konnte festgestellt werden, dass die Bodenatmung bei einem trockenen Boden im

Tagesverlauf höher war als in der Nacht. Bei einem feuchten Boden waren keine signifikanten Unterschiede feststellbar (vgl. MESSNER, 2010, 14).

Außerdem hat der pH-Wert des Bodens Auswirkungen auf die Höhe der Kohlendioxidemissionen. Ein geringer bis niedriger pH-Wert unterdrückt die Aktivität der Mikroorganismen, wodurch auch die Kohlendioxidemissionen gering ausfallen. So konnten um das zwölffache niedrigere Kohlendioxidemissionen bei einem pH-Wert von 3 gemessen werden, als bei einem pH-Wert von 4. Weiters konnte eine Zunahme der Emissionen bis zu einem pH-Wert von 7 verzeichnet werden, während ab einem pH-Wert von 7 eine Abnahme der Emissionen festzustellen ist. Bei einer Erhöhung des pH-Wertes auf 8,7 wurde ein Rückgang von ca. 18 % beobachtet. Ein noch stärkerer Rückgang der Kohlendioxidemissionen von 88 % konnte bei einem pH-Wert von 10 gemessen werden (vgl. MESSNER, 2010, 15).

Neben dem globalen und anthropogen beeinflussten Kohlenstoffkreislauf gibt es auch noch den terrestrischen, auf den in der folgenden Beschreibung ausschließlich eingegangen wird. Für die Bildung organischer Substanz benötigt die Pflanze CO_2 . Allerdings werden bei der Spaltung des Kohlendioxides nicht 100 % Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben, sondern nur ca. 50 %, da die Pflanze das Kohlendioxid, welches bei der Primärproduktion aufgenommen wurde und zu Kohlenhydraten umgewandelt worden ist, durch die Wurzelatmung in Form von Kohlendioxid teilweise wieder an die Atmosphäre abgibt. Durch die heterotrophe Atmung sowie die thermische Oxidation, die aber nur einen geringeren Teil ausmacht, wird die verbleibende Nettoproduktion wieder an die Atmosphäre abgegeben. Die bei der Nettoproduktion gebildete organische Substanz wird zu Detritus (= zerfallene organische Substanz im Zustand der Aufschließung) und anschließend teilweise durch Mikroorganismen abgebaut. Wenn die organische Substanz nicht abgebaut wird, kann sie in schwer abbaubare organische Substanz umgewandelt werden. Ein sehr geringer Teil der schwer abbaubaren organischen Substanz wird in noch schwerer abbaubare organische Substanz umgesetzt. Sie bildet mit dem bei einer Verbrennung entstehenden „black carbon“ den inerten Teil der organischen Substanz des Bodens. Die Funktion des inerten Teiles der organischen Substanz ist aber bisher noch wenig geklärt, wobei man annimmt, dass der inerte Teil der organischen Substanz an verschiedenen biologischen Kreisläufen beteiligt ist (vgl. MESSNER, 2010, 8).

Böden sind also nicht nur Kohlenstoffsinken, sondern auch Kohlenstoffquellen. Wenn man den Kohlenstoffhaushalt der Böden weltweit betrachtet, so kann eine generelle Abnahme des Kohlenstoffgehaltes durch Veränderungen in der Landnutzung vernommen werden. Die Reduktion beginnt bei der Kultivierung von Böden für landwirtschaftliche Zwecke und nimmt seit der landwirtschaftlichen Revolution im vorherigen Jahrhundert durch die Mechanisierung der Landwirtschaft (z.B. Pflugtiefe) stetig zu (vgl. MESSNER, 2010, 9). In der Diskussion über die Senkung der globalen Kohlendioxidemissionen darf also nicht nur die Verbrennung fossiler Energieträger, sondern muss auch die Reduktion der bodenbürtigen Emissionen betrachtet werden. Beide Faktoren müssen drastisch reduziert werden. Um die bodenbürtigen Kohlendioxidemissionen zu verringern, können drei Strategien angewendet und umgesetzt werden:

- Durch die Erhöhung der Nettoprimärproduktion soll ein vermehrter Kohlendioxidfluss aus der Atmosphäre in die Böden stattfinden, wodurch auch der Nettokohlenstoffeintrag in den Boden erhöht wird.
- Größere Mengen der schwer abbaubaren organischen Substanz der Nettoprimärproduktion sollen gespeichert werden.
- Der Abbau der organischen Substanz im Boden soll verringert und verlangsamt werden (vgl. MESSNER, 2010, 10).

Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)

Der gelöste organische Kohlenstoff (dissolved organic carbon = DOC) bildet gemeinsam mit dem ungelösten organisch gebundenen Kohlenstoff (particulate organic carbon = POC) und dem flüchtigen organisch gebundenen Kohlenstoff (volatile organic carbon = VOC) den organisch gebundenen Gesamtkohlenstoff (total organic carbon = TOC). Weiters weist er auf die im Wasser gelöste organische Substanz hin, wodurch er als organischer Summenparameter fungiert (vgl. N.N., s.a., s.p.).

Dem (DOC) werden alle organischen Kohlenstoffverbindungen zugerechnet, die durch einen Filter mit 0,45 µm Porenweite fließen können. Die Zuordnung der einzelnen Stoffe in die Klasse des gelösten organischen Kohlenstoffes ist aber auch oftmals historisch bedingt. Zum

DOC werden z.B. die Huminstoffe, organische Säuren, Saccharide, Aminosäuren, usw. gezählt. Die dem DOC zugehörigen Substanzen umfasst eine große Palette. Diese genannten Stoffe werden teilweise durch Pflanzen (Exsudate) in den Boden abgesondert, aber auch durch die Zersetzung der organischen Substanz durch die Mikroorganismen kommt es zur Bildung dieser Verbindungen (vgl. SCHWALM, s.a., s.p.).

Des Weiteren beeinflusst die Streumenge- und Qualität die DOC-Konzentration im Bodensickerwasser. So kann gesagt werden, dass ein hoher Streueintrag höhere bzw. größere DOC-Werte und -Mengen verursacht. Die Pflanzenart hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung und wahrscheinlich auch auf die Menge der Wurzelexsudate. So können die Exsudate bis zu 10 % des DOCs ausmachen (vgl. STEINBEISS, 2006, 46).

DOC ist ein wichtiges Nährstoffsubstrat für Mikroorganismen und ein natürlicher Bestandteil der Bodenlösung, wodurch er in der Folge an vielen wichtigen Prozessen beteiligt ist. DOC wirkt an den Bodenbildungsprozessen mit, z.B. durch die Förderung der mineralischen Verwitterung. Auch kann er in Zusammenhang mit der Podsolierung von Böden gebracht werden. Wenn nur noch wenig Sauerstoff im Boden vorhanden ist, wirken die DOC-Moleküle als Elektronendonator und sind beispielsweise für die Denitrifikation verantwortlich (vgl. SCHWALM, s.a., s.p.).

DOC entsteht bei anaeroben Verhältnissen im Boden durch die Fermentation und unter aeroben Bedingungen in Folge der Oxidation der organischen Substanz. Die Mikroorganismen bauen die organischen Materialien im Boden ab, wobei sie wiederum selbst nach ihrem Absterben ein leicht verwertbares Nährsubstrat für andere Mikroorganismen sind. Interessant ist, dass sich mehr als die Hälfte der aktiven Mikroorganismen in unmittelbarer Wurzelnähe befinden.

Im aeroben Bereich erfolgt der mikrobielle Abbau des mobilen DOCs durch die mikrobielle Respiration, wodurch Kohlendioxid entsteht. Bei anaeroben Bedingungen kann der DOC bei der Sulfat- und Nitratreduktion zur Kohlendioxidbildung, aber auch bei der Methanogenese zur Methangasbildung beitragen. Der DOC kann nochmals in zwei Fraktionen hinsichtlich seiner Abbaugeschwindigkeit unterteilt werden, nämlich in ein für die Mikroorganismen kurzfristiges (labil), das nur für ein paar Stunden oder Tage besteht und in ein langfristiges (rekalzitrant), das mehrere Jahre lang nicht zersetzt wird (vgl. SCHWALM, s.a., s.p.).

Dabei wird der stabile Teil des DOCs, der den Hauptanteil am DOC ausmacht, in tiefere Bodenschichten durch das Bodensickerwasser verlagert. Die stabilen Stoffe sind höhermolekulare Verbindungen wie etwa z.B. Huminstoffe oder aromatische Verbindungen (vgl. STEINBEISS, 2006, 46).

Bei der Photosynthese wird Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid aufgenommen. 50 % des aufgenommenen Kohlenstoffes werden in das Wurzelsystem geliefert. So stellt die Rhizodeposition die Hauptquelle des organischen Materials dar. Sie setzt sich aus der Exsudation, der Sekretion, der Verschorfung und Auflösung von Zellen und Wurzelgewebe zusammen. Diese Prozesse entstehen während der Alterung bzw. des Wachsens einer Pflanze und sind ganz normal. Wurzelexsudate werden rasch von den Mikroorganismen umgesetzt. Ein Teil dieser Substanzen (Zucker und Aminosäuren) können aber nicht nur von Mikroorganismen, sondern auch von den Wurzeln der Pflanze wieder assimiliert werden. Durch diesen Mechanismus ist die Pflanze in der Lage, einen Teil des sonst verlorenen Kohlenstoffes wieder aufzunehmen und somit den Verlust des Kohlenstoffes zu senken und ihn für die Bildung pflanzlichen Materials wieder zu nützen (vgl. STEINBEISS, 2006, 47).

Die verschiedenen Pflanzenarten haben Einfluss auf die Höhe des DOC-Gehaltes. Aber auch die verschiedenen Jahreszeiten wirken sich auf den DOC-Gehalt aus. Dies kann vor allem bis in eine Bodentiefe von ca. 20 cm vernommen werden. Je nach Jahreszeit wird der DOC-Wert einerseits von der Pflanzenaktivität, die wiederum vom Wachstumsstadium und Wurzelumsatz abhängt, und andererseits von abiotischen Faktoren, wie etwa dem Niederschlag, der Niederschlagsverteilung und der Temperatur gesteuert. Der Bodenwassergehalt und die Bodentemperatur zeichnen für die mikrobielle Aktivität am meisten verantwortlich. Die mikrobiellen Umsetzungsprozesse sind im Winter aufgrund der niedrigen Bodentemperatur sehr gering, obwohl der Wassergehalt des Bodens in dieser Jahreszeit meistens sehr hoch ist. Im Sommer ist genau das Gegenteil der Fall. So sind im gemäßigten Klimaraum die höchsten Umsetzungsprozesse vor allem im Frühling aber auch im Herbst zu finden. Dadurch ist die DOC-Konzentration im Frühjahr auch höher, als im Winter (vgl. STEINBEISS, 2006, 49).

Im Herbst sind jedoch in einer Tiefe von 30 cm die Temperaturen höher als in den oberen Bodenschichten. Die Mikroorganismen sind daher dort länger tätig. Auch wenn kein DOC von

oben mehr nachgeliefert wird, wird in dieser Tiefe organische Substanz umgesetzt und DOC gebildet (vgl. STEINBEISS, 2006, 52).

Wenn der DOC in Grund- und Oberflächengewässern zu hoch ist, ist dies als problematisch anzusehen. Der DOC vermindert die Wasserqualität erheblich, wobei die Trinkwasseraufbereitung erschwert wird. Des Weiteren führen die Bildung, der Austrag und der Abbau des DOCs durch Mikroorganismen zum Verlust des gespeicherten Kohlenstoffes im Boden. Ein Abbau des DOCs kann auch wie schon erwähnt zu Lachgas- und Methangasemissionen führen. Kohlendioxid wird ohnehin immer beim Abbau des DOCs gebildet. Die Freisetzung des Kohlenstoffes bzw. der Verlust durch gelöste organische Verbindungen (DOC) geschieht viel rascher als die Anreicherung des Kohlenstoffes im Boden (vgl. SCHWALM, s.a., s.p.). Daher ist es wichtig, den Humusgehalt und somit auch den Anteil des Kohlenstoffes im Boden zu erhöhen und somit den Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre zu reduzieren.

3. Material und Methoden

3.1. Versuchsstandorte

Insgesamt wurde an 5 Standorten (Abb. 1) ein weitgehend übereinstimmendes Versuchsdesign angelegt.

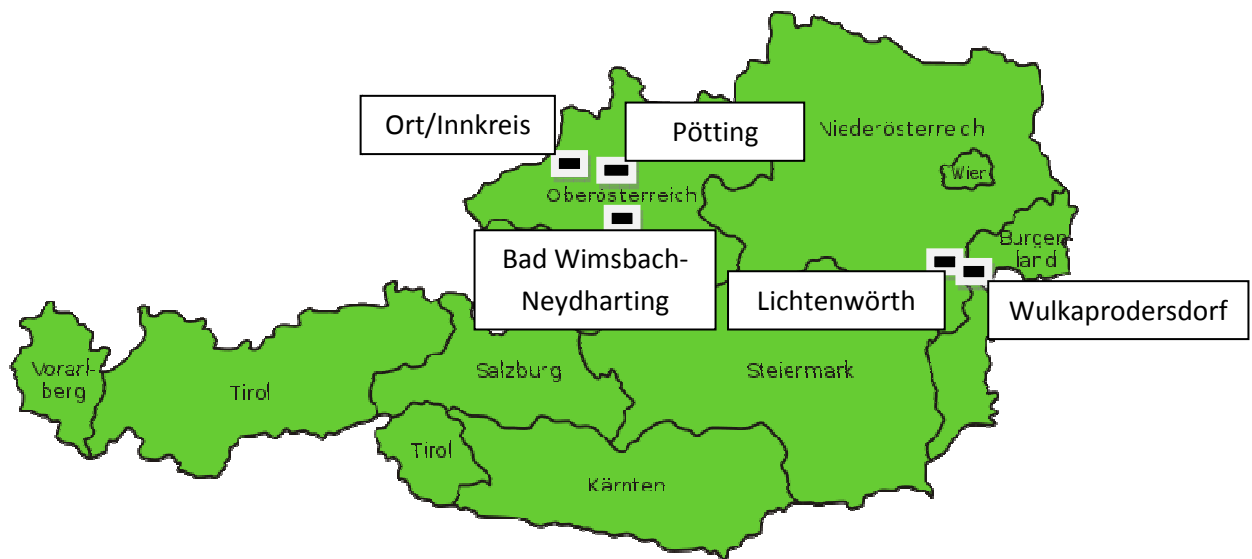


Abbildung 1 Versuchsstandorte (vgl. WELTATLAS.INFO, 2013, s.p.)

Die Standortwahl in Oberösterreich als Feuchtgebiet wurde gemeinsam mit der Boden.Wasser.Schutz.Beratung der Landwirtschaftskammer Oberösterreich getroffen. Der Standort im Innviertel war seitens der Projektpartner bereits als Schauversuch für das InterReg Projekt Iva „Gewässerzukunft“ Antiesen geplant. Hier wurde nur die für den Versuch erforderliche Versuchsanordnung übernommen.

Der Standort Pöcking wurde bereits frühzeitig für den gesamten Bereich der bodenbürtigen Emissionen eingeplant. Da es sich bei den Versuchsflächen um betriebseigene Flächen handelt, wurden hier auch Gasmessungen durchgeführt. Weiters liegt der Standort Pöcking geographisch in der Mitte der anderen beiden Versuchsflächen in einer Entfernung von jeweils ungefähr 35 Kilometern.

Der Standort in Bad Wimsbach-Neydharting wurde von den Projektpartnern vorgeschlagen. Dipl. HLFL Ing. Franz Kastenhuber übernimmt regelmäßig für die Landwirtschaftskammer Oberösterreich eine Fülle von Versuchen und so war es besonders naheliegend, auch auf diesem Betrieb einen Versuch anzulegen.

In Niederösterreich befand sich der Versuchsstandort in Lichtenwörth in der Nähe von Wr. Neustadt. Der Standort im Burgenland war in Wulkaprodersdorf, welcher nur wenige Kilometer von Eisenstadt entfernt ist. Die beiden Standorte liegen wiederum nur ca. 15 Kilometer auseinander. Die Gasmessungen erfolgten im Trockengebiet nur am Standort Lichtenwörth.

3.2. Standortbeschreibung im Feuchtgebiet

Die angeführten Beschreibungen der Versuchsflächen entstammen der Österreichischen Bodenkartierung. Mit der digitalen Web-GIS-Applikation lassen sich für die bereits kartierten landwirtschaftlichen Flächen gezielt sämtliche Standorteigenschaften abrufen (vgl. BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD, NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT, 2013, s.p.).

3.2.1. Ort im Innkreis

Betrieb Sieglinde und Johann Sinzinger

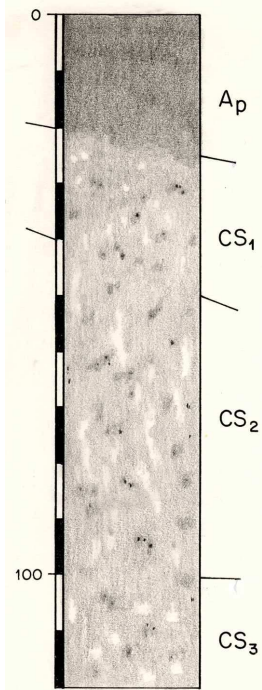
Aichberg 10, 4974 Ort im Innkreis

Grundstücksnummer: 375, 377 und 380, Katastralgemeinde: Aichberg

Tabelle 2 Bodenkartierung Ort/Innkreis 1

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	30
	Bodenform	39
	Größe der Bodenform	875 ha
	Lage und Vorkommen	Hügelland, leicht hängig und Verebnungen; in Ort, Lambrechten und Utzenaich
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus lehmig-schluffigen Deckschichten über tonigem Schlier
	Wasserverhältnisse	gut versorgt; mäßige Speicherkraft, geringe Durchlässigkeit durch Dichtlagerung
	Horizonte	Ap(25); B(50-60); CS(100)
	Bodenart und Grobanteil	Ap lehmiger Schluff bis sandiger Schluff; B lehmiger Schluff, zum Teil schluffiger Lehm; CS schluffiger Lehm
	Humusverhältnisse	Ap mittelhumos; Mull
	Kalkgehalt	kalkfrei; der Kalkgehalt im Ap-Horizont ist anthropogen bedingt
	Bodenreaktion	schwach sauer bis sauer; die Krume ist teilweise neutral
	Erosionsgefahr	nicht gefährdet
	Bearbeitbarkeit	gut zu bearbeiten und zu befahren
	Natürlicher Bodenwert	hochwertiges Ackerland, hochwertiges Grünland

Tabelle 3 Bodenkartierung Ort/Innkreis 2

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	30
	Bodenform	42
	Größe der Bodenform	1090 ha
	Lage und Vorkommen	Hügelland, eben bis leicht hängig; in Lambrechten, Utzenaich, Ort und St. Martin
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	typischer Pseudogley aus lehmig-tonigem, kalkfreiem Schliermaterial
	Wasserverhältnisse	wechselfeucht; hohe Speicherkraft, geringe Durchlässigkeit infolge Dichtlagerungen, zeitweiser Wasserstau; auf Grund der Bodenschwere verhältnismäßig geringer Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser
	Horizonte	Ap(20-25); CS1(40-45); CS2(100); CS3(120);
	Bodenart und Grobanteil	Ap, CS1 schluffiger Lehm; CS2 schluffiger Lehm bis lehmiger Ton; CS3 schluffiger Lehm
	Humusverhältnisse	Ap mittelhumos; Mull
	Kalkgehalt	kalkfrei; Krume durch Düngung stellenweise schwach kalkhaltig
	Bodenreaktion	schwach sauer bis sauer
	Erosionsgefahr	nicht gefährdet
	Bearbeitbarkeit	infolge Dichtlagerung und hohen Tongehaltes erschwerte Beackung; in Feuchtperioden Grünland schlecht befahrbar
	Natürlicher Bodenwert	mittelwertiges Ackerland, hochwertiges Grünland

Der Boden am Standort Ort im Innkreis (Tabelle 2 und 3) ist vom Bodentyp her gemischt. Auf einem Teil des Schlages herrscht eine pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus lehmig-schluffigen Deckschichten über tonigem Schlier vor. Der andere Teil ist ein

typischer Pseudogley aus lehmig-tonigem, kalkfreiem Schliermaterial. Der Versuch wurde auf beiden Bodentypen angelegt. Da auf dem Standort Pötting ein Pseudogley vorherrscht, wird hier auf eine genauere Beschreibung verzichtet.

Braunerden zeichnen sich durch einen humosen A-Horizont aus. Dieser geht gleitend in einen braun gefärbten Bv-Horizont in unterschiedlichen Tiefen über. Der C-Horizont folgt darunter in einer Tiefe von 100 Zentimeter.

Hinsichtlich der Entwicklung gehen Braunerden aus Rankern, Regosolen oder Pararendzinen hervor. Diese Entwicklung beginnt, wenn durch Verbraunung und Verlehmung durch die Silikatverwitterung jene Bodenschichten erfasst werden, in denen kein Humus mehr angereichert wurde. Weiters ist auf dem Standort eine Pseudovergleyung festzustellen. Hierbei handelt es sich um eine durch temporären Wasserüberschuss ausgelöste Wassersättigung des Bodens mit einhergehender Reduktion von Eisen- und Manganoxiden. Bei nachfolgender Oxidation entstehen die typischen Rostflecken und Konkretionen vor allem im Aggregatinneren. Diese Pseudovergleyung bewirkt im Vergleich zur Vergleyung eine Umverteilung von Nährstoffen (vgl. SCHEFFER et al., 1998, 395). Die Eigenschaften schwanken je nach den Ausgangsmaterialien relativ stark. Hinsichtlich der Wasserverhältnisse zeichnet sich der Standort durch eine mäßige Speicherfähigkeit aus. Durch entsprechende Dichtlagerungen in den unteren Horizonten kann es zu Wasserstauungen kommen, welche die Pseudovergleyung erklären.

Hinsichtlich des Humusgehaltes weist der Standort einen mittleren Gehaltswert mit der Humusform Mull auf. Mull bildet sich unter günstigen Standortbedingungen hinsichtlich Wasser- und Luftversorgung. Einnährstoffreicher Boden mit viel, gut abbaubarer Streu begünstigt die Mullbildung (vgl. SCHEFFER et al., 1998, 386).

Der Bodenwert dieser Flächen kann als hoch bezeichnet werden. Generell kann der Wert einer Braunerde sehr stark schwanken, durch entsprechende Zuführung von Dünger und auch organischer Substanz können allerdings hohe Erträge erzielt werden (vgl. SCHEFFER et al., 1998, 425).

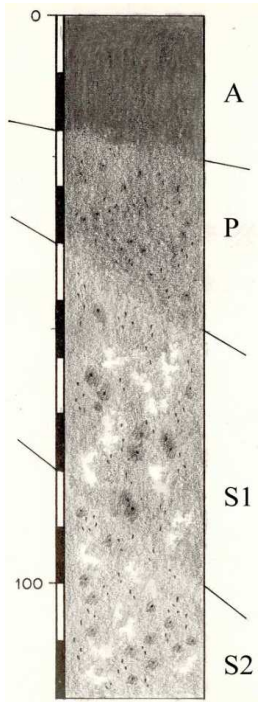
3.2.2. Pötting

Betrieb Alois Märzendorfer

Kronlach 1, 4720 Pötting

Grundstücksnummer: 976, Katastralgemeinde: Spielmannsberg

Tabelle 4 Bodenkartierung Pötting

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	96
	Bodenform	24
	Größe der Bodenform	3203 ha
	Lage und Vorkommen	Hügelland; Decklehmgebiet
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	Typischer Pseudogley, kalkfrei oder schwach kalkhaltig aus lehmig-schluffigen Deckschichten (Deckenlehm)
	Wasserverhältnisse	wechselfeucht; geringe Durchlässigkeit infolge Dichtlagerung im Unterboden, mäßige Speicherkraft
	Horizonte	A(20-25); P(40-55); S1(80-100); S2(120);
	Bodenart und Grobanteil	A,P Schluff bis lehmiger Schluff; S1 lehmiger Schluff; S2 schluffiger Lehm
	Humusverhältnisse	A mittelhumos; Mull
	Kalkgehalt	A, P kalkfrei bis schwach kalkhaltig
	Bodenreaktion	A neutral; P, S1, S2 schwach sauer
	Erosionsgefahr	nicht gefährdet
	Bearbeitbarkeit	bei Ackernutzung zeitweise infolge der Wechselfeuchtigkeit Bearbeitung erschwert
	Natürlicher Bodenwert	mittelwertiges Ackerland, mittelwertiges Grünland

Der Boden am Standort Pötting (Tabelle 4) ist ein typischer Pseudogley aus lehmig-schluffigen Deckschichten (Deckenlehm). Hinsichtlich des Kalkgehaltes ist er kalkfrei oder schwach kalkhaltig. Der Bodentyp Pseudogley gehört zusammen mit dem Stagnogley und dem Haftpseudogley zur Klasse der Stauwasserböden. Diese zeichnen sich durch redoximorphe Merkmale aus, welche durch gestautes Grundwasser hervorgerufen werden. Pseudogleye sind also grundwasserferne Böden, bei denen ein Wechsel von Stauwasser und folgender Austrocknung Konkretionen und Rostflecken vornehmlich im Aggregatinneren verursacht. Die Oberfläche der Aggregate bleibt dabei gebleicht (vgl. SCHEFFER et al., 1998, 432).

Der Boden weist einen typischen Staukörper in unterschiedlichen Tiefen auf. Hier ist die Durchlässigkeit sehr gering und bewirkt dadurch die Stauung des Wassers in höhere Schichten.

Hinsichtlich der Entwicklung entstehen Pseudogleye durch Redoximorphose, bei der es zur Bildung dieser für den Boden typischen redoximorpher Merkmale kommt. Für diesen Vorgang ist ein periodischer Wechsel zwischen Vernässung und Austrocknung erforderlich. Auf dem Standort in Pötting handelt es sich um eine temporäre Staunässe, die durch die Dichtlagerung im Unterboden verursacht wird. Die Staunässe tritt nahe an der Bodenoberfläche auf und verschwindet im Laufe der Vegetation wieder sehr rasch. Die Staunässe bedingt einen Sauerstoffmangel im Boden, welche eine Lösung und Umverteilung von Eisen und Mangan bewirkt.

Die Eigenschaften von Pseudogleyen sind sehr stark von der Dauer der Staunässe, beziehungsweise von der Zeit des Sauerstoffmangels beeinflusst. Sie sind generell temporär luftarme Böden, welche in den oberen Bodenschichten aufgrund der vermehrten Durchwurzelung häufig schnell austrocknen. Die Dauer der Staunässe hängt stark von den klimatischen Gegebenheiten, von der Durchlässigkeit und der Mächtigkeit des Staukörpers und vom Relief ab.

Pseudogleye sind sehr weit verbreitet und typische Böden humider Klimate. Aber auch in kalten und gemäßigten Zonen bis zu den humiden Tropen können sie vorkommen.

Der Boden am Standort Pötting ist als mittelwertiges Acker- und Grünland zu bezeichnen. Aufgrund der oft länger anhaltenden Frühjahrsvernässung ist eine Bearbeitung erst später

möglich. In trockenen Jahren kann aber der Boden durch die Wasserstauung durchwegs auch seine Vorteile ausspielen und die Wasserversorgung der Kulturen über eine längere Zeit gewährleisten. Eine tiefere Bearbeitung des Bodens ist für eine entsprechende Durchlüftung notwendig. Durch Sackung geht allerdings diese lockere Lagerung wieder verloren und so sollte zum Beispiel über tiefwurzelnende Zwischenfrüchte auch eine biologische Bodenlockerung erfolgen (vgl. SCHEFFER et al., 1998, 425).

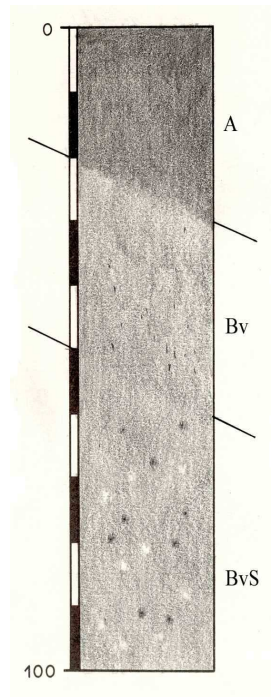
3.2.3. Bad Wimsbach-Neydharting

Betrieb Maria und Dipl. HLFL Ing. Franz Kastenhuber

Bachloh 19, 4654 Bad Wimsbach-Neydharting

Grundstücksnummer: 1257, Katastralgemeinde: Bachloh

Tabelle 5 Bodenkartierung Bad Wimsbach - Neydharting

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	69
	Bodenform	17
	Größe der Bodenform	1145 ha
	Lage und Vorkommen	Hochterrasse; eben
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus lehmig-schluffigen Deckschichten
	Wasserverhältnisse	gut versorgt (Tendenz zur Wechselfeuchtigkeit); hohe Speicherkraft
	Horizonte	A(20-30); Bv(50-60); BvS(100);
	Bodenart und Grobanteil	A lehmiger Schluff bis Schluff; B lehmiger Schluff; BvS schluffiger Lehm
	Humusverhältnisse	A mittelhumos; Mull
	Kalkgehalt	kalkfrei
	Bodenreaktion	schwach sauer
	Erosionsgefahr	nicht gefährdet
	Bearbeitbarkeit	bei Acker- und Grünlandnutzung gut zu bearbeiten, geringe Verschlämmungsneigung
	Natürlicher Bodenwert	hochwertiges Ackerland, hochwertiges Grünland

Der Boden am Standort Bad Wimsbach-Neydharting (Tabelle 5) ist eine pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus lehmig-schluffigen Deckschichten. Hinsichtlich der Abfolge der Horizonte entspricht der Boden einer typischen Braunerde, welche sich durch einen humosen A-Horizont auszeichnet. Dieser geht gleitend in einen braun gefärbten Bv-Horizont in unterschiedlichen Tiefen über. Der C-Horizont folgt darunter in einer Tiefe von über 100 Zentimeter.

Der Boden an diesem Standort ähnelt dem vorherrschenden Bodentyp am Versuchsstandort in Ort im Innkreis. Hinsichtlich der Wasserspeicherfähigkeit weist dieser Standort eine hohe Speicherkraft auf, mit einer Tendenz zu einem leichten Wasserstau im Oberboden.

Die Humusverhältnisse auf dieser Versuchsfläche sind mittelhumos, mit der vorherrschenden Humusform Mull. Der Boden ist bei Ackernutzung gut zu bearbeiten und die Gefahr einer Bodenverschlammung ist als eher gering einzustufen. Es handelt sich um ein hochwertiges Ackerland mit einer hohen Ertragsfähigkeit.

3.2.4. Vegetationsbedingungen im Feuchtgebiet

Die Vegetationsbedingungen in Oberösterreich im Versuchszeitraum von Juli 2012 bis April 2013 entsprachen nur teilweise langjährigen Durchschnitten, nachdem im Frühjahr und im Sommer 2012 vermehrt Trockenheit und Starkregenereignisse zu verzeichnen waren.

Hinsichtlich des Temperaturverlaufes lag der Versuchszeitraum im Jahr 2012 über den langjährigen Durchschnitt. Eine mittlere Erhöhung der Temperatur im Jahr 2012 um rund 1°C wurde festgestellt. Deutlich erhöhte Temperaturen konnten in den Monaten März, Juni, August und November gemessen werden (vgl. VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG, 2012, 30). Im Frühjahr 2013 zeigte sich ein uneinheitliches Bild. Der Jänner lag wie das vergangene Jahr über dem langjährigen Durchschnitt. Der Februar war im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt eher kühl und der März begann mit neuen Höchsttemperaturen. Durch eine starke Abkühlung im Lauf des März lag dieser Monat allerdings dann unter dem langjährigen Mittel. Die Kälteperiode, die bereits Mitte März begann, setzte sich auch Anfang April noch fort. Mit einer Wetterumstellung setzten sich aber sommerliche Temperaturen durch und so lag der April schlussendlich über dem langjährigen Durchschnitt (vgl. ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, 2013, s.p.).

Es kann also gesagt werden, dass der Versuchszeitraum durch teilweise extreme Witterungsereignisse wie hohe monatliche Temperaturschwankungen und einer Kälteperiode im Frühjahr 2013 geprägt war.

Die Niederschlagsverteilung im Versuchszeitraum wurde anhand der meteorologischen Messstationen der ZAMG im näheren Umfeld der Versuchsflächen ermittelt und graphisch dargestellt. Es kann gesagt werden, dass die Verteilung des Niederschlages nur teilweise dem langjährigen Durchschnitt entspricht, da gerade der trockene Herbst und der darauffolgende sehr feuchte Winter prägend für den Versuchszeitraum waren.

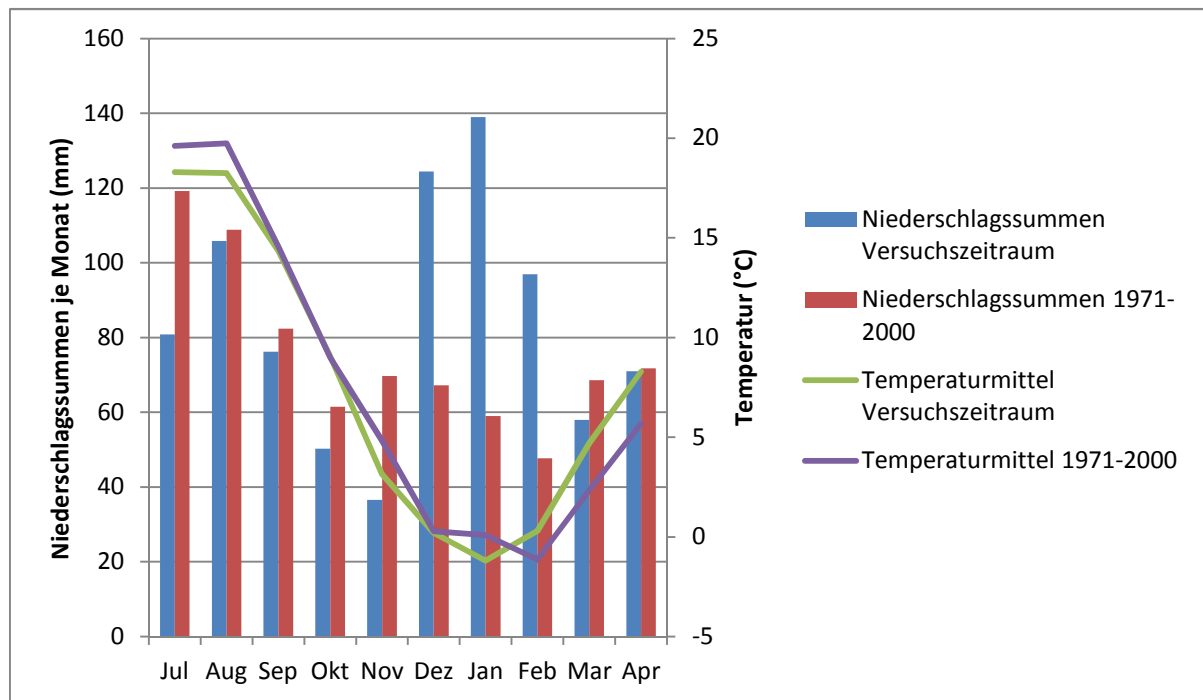


Abbildung 2 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Ried/Innkreis (Versuchsstandort Ort/I.)

Die Niederschlagsverteilung an der ZAMG Messstelle Ried im Innkreis (Abb. 2) zeigt ein typisches Bild, wie es auch auf den anderen Graphiken in Oberösterreich zu verzeichnen ist. Einem durchschnittlichen Sommer mit heftigen lokalen Niederschlägen in Form von

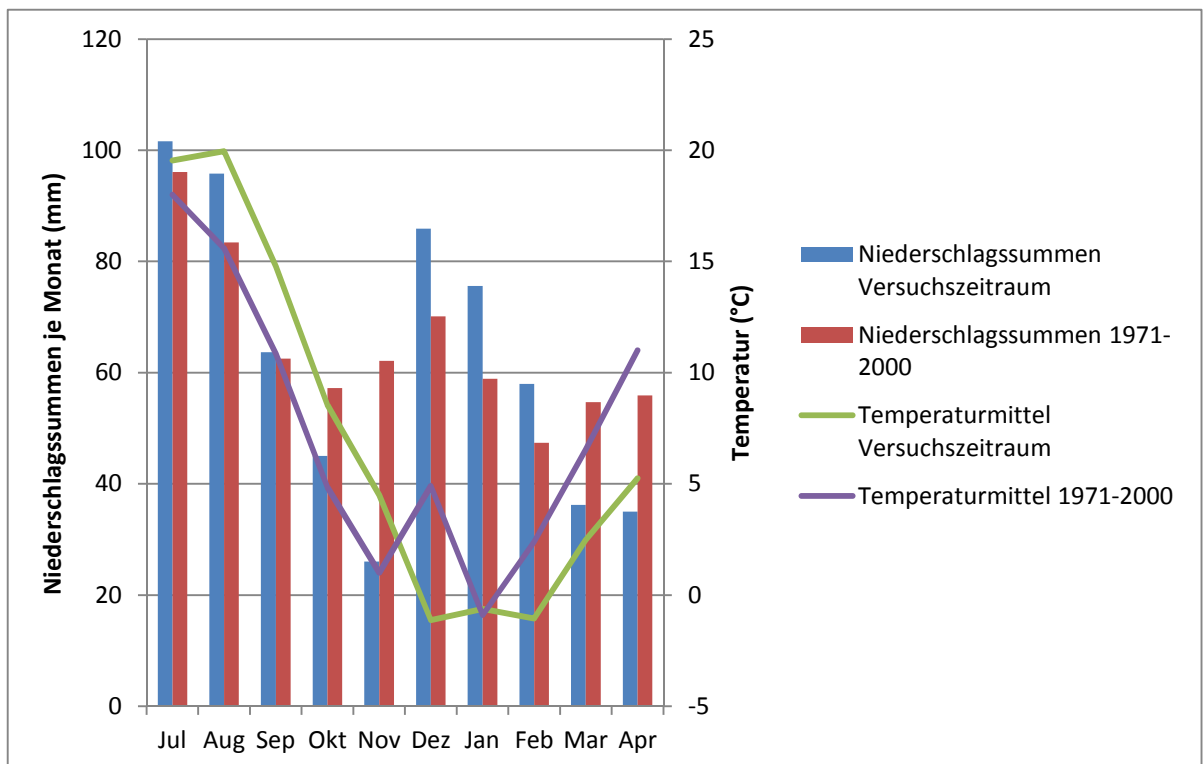


Abbildung 3 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Waizenkirchen (Versuchsstandort Pötting)

Unwettern, wie in Ried im Innkreis im Monat Juli, folgte ein trockener November und ein feuchter Winter mit großen Regen- und Schneemengen. Das Frühjahr 2013 mit März und April folgte dann wieder dem langjährigen Trend.

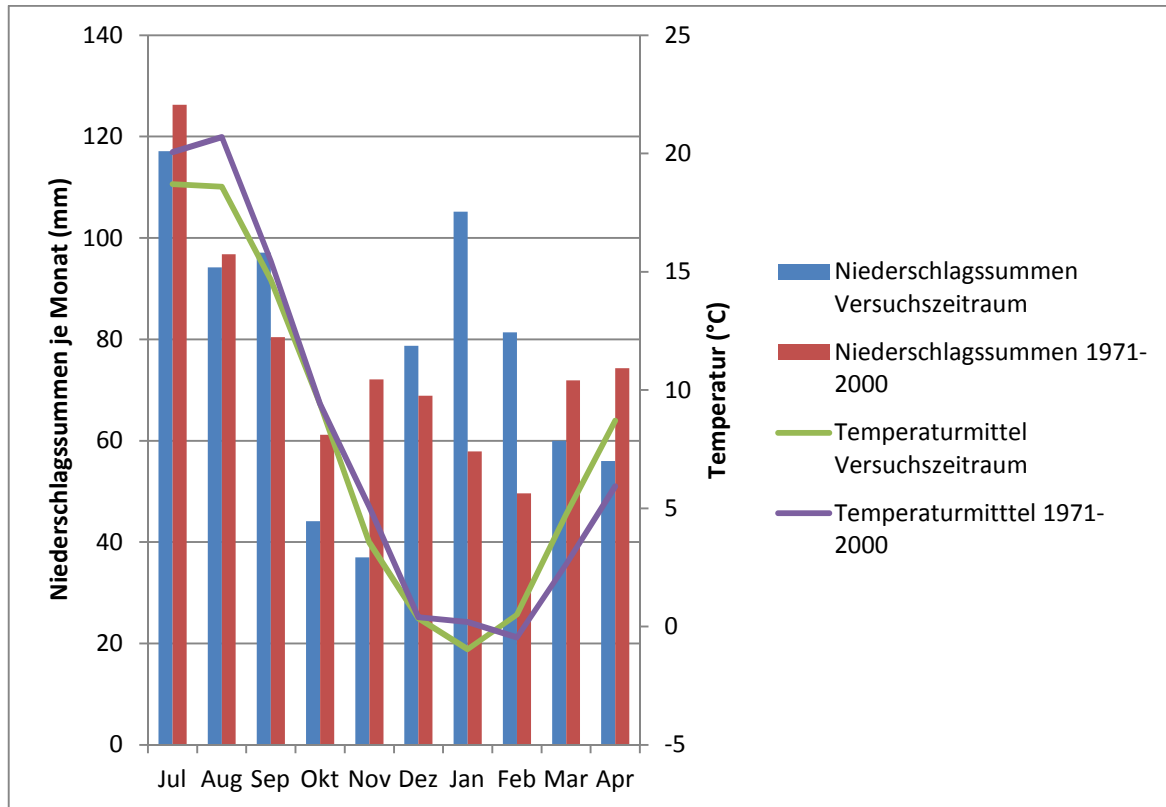


Abbildung 4 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Kremsmünster (Versuchsstandort Bad Wimsbach-Neydharing)

Die ZAMG Messstellen in Waizenkirchen (Abb. 3) und Kremsmünster (Abb. 4) zeigen ebenfalls ein ähnliches Bild feuchter Witterung im Dezember 2012, sowie im Jänner und Februar 2013. Im Vergleich zum Standort Ried im Innkreis verzeichneten die beiden Messstellen allerdings im März und April 2013 leicht unterdurchschnittliche Niederschläge.

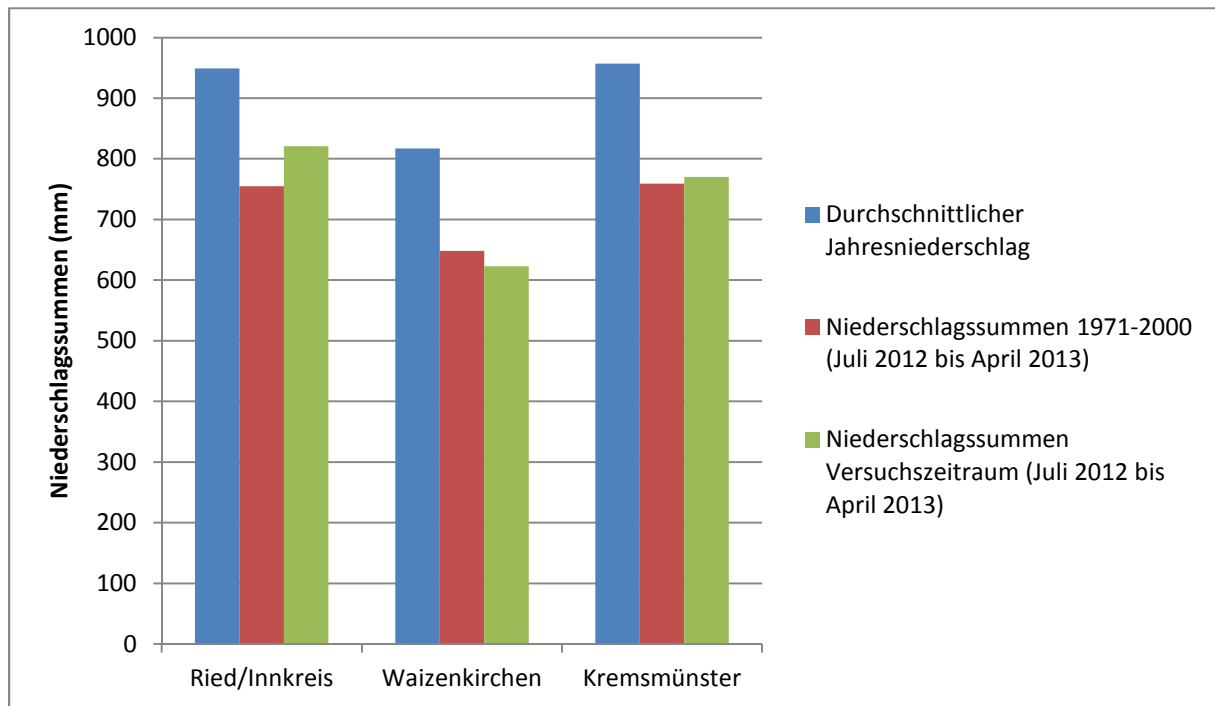


Abbildung 5 Vergleich der Niederschlagssummen an den Messstellen im Feuchtgebiet (ÖÖ)

Fasst man die Ergebnisse der einzelnen Monate zusammen, ergibt sich wie ein auf dem Diagramm dargestelltes Bild (Abb. 5). Für die einzelnen Messstellen sind der durchschnittliche Jahresniederschlag und der durchschnittliche Niederschlag im Versuchszeitraum von Juli 2012 bis April 2013 abgebildet. Interessant sind die Abweichungen des Versuchszeitraumes vom langjährigen Durchschnitt. So zeigt die Messstelle in Ried im Innkreis eine Abweichung von plus 70 mm Niederschlag und Waizenkirchen eine Abweichung von minus 25 mm Niederschlag. Die Messstelle in Kremsmünster zeigt eine nur geringe Abweichung zum langjährigen Mittel von plus 10 mm Niederschlag.

Für die Ermittlung der gasförmigen Emissionen aus dem Boden war für den Versuch auch der Niederschlag in Form von Schnee beziehungsweise die Schneelage und folgende Tauperioden von großer Bedeutung. Der Versuchszeitraum war geprägt von guten Wachstumsbedingungen bis in den Oktober hinein und diese wurden dann durch einen frühen Wintereinbruch Ende Oktober mit mehreren Zentimetern Schnee beendet. Der frühe Schneefall hielt allerdings nicht lange an und so war der November schneefrei. Anfang und Mitte Dezember fielen mehrere Zentimeter Schnee und blieben auch liegen. Durch die Schneedecke war der Boden nicht gefroren und auch geschützt gegen den strengen Frost vor Weihnachten. Eine folgende Tauperiode und auch starke Niederschläge zu Beginn des Jahres

2013 führten zu einer beinahe vollständigen Wassersättigung des Bodens. Mitte Jänner sank die Temperatur wieder ab und es fielen wieder rund 15 bis 20 cm Schnee. Der folgende Februar war geprägt von tauenden Wetterbedingungen mit immer wieder zusätzlichem Schneefall. Anfang März setzte sich dann für kurze Zeit frühlingshaftes Wetter durch, welches aber Mitte März durch strengen Morgenfrost unterbrochen wurde. Ende März und Anfang April fiel auch noch einmal Schnee. Nach diesen letzten Schneefällen stiegen die Temperaturen ab Anfang beziehungsweise Mitte April.

Hinsichtlich des Schneefalles und der Schneelage kann über den Winter im Versuchszeitraum gesagt werden, dass dieser durch einen frühen Beginn mit immer wieder teils großen Schneemengen, aber auch vielen Tauperioden und einer eher feuchten Witterung zu Beginn des Jahres 2013 und einem späten Frühlingsbeginn geprägt war.

3.3. Standortbeschreibung im Trockengebiet

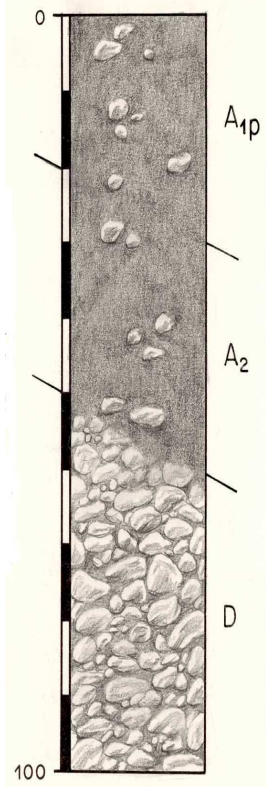
3.3.1. Lichtenwörth

Betrieb Ing. Thomas Gergela

Hauptstraße 20, 2490 Lichtenwörth

Grundstücksnummer: 3867, Katastralgemeinde: Lichtenwörth 23419

Tabelle 6 Bodenkartierung Lichtenwörth

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	33
	Bodenform	17
	Größe der Bodenform	1602 ha
	Lage und Vorkommen	Ebene; vorwiegend im Wiener Becken
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	Tschernosem aus feinem und grobem Schwemmmaterial
	Wasserverhältnisse	trocken; geringe Speicherkraft
	Horizonte	A1p(20-30); A2(50-60); D(100)
	Bodenart und Grobanteil	A1p sandiger Lehm oder sandiger Schluff; A2 sandiger Lehm oder sandiger Schluff mit mäßigem Schotter-und Kiesanteil
	Humusverhältnisse	A1p, A2 mittelhumos bis stark humos; Mull
	Kalkgehalt	stark kalkhaltig
	Bodenreaktion	Alkalisch
	Erosionsgefahr	mäßig windgefährdet
	Bearbeitbarkeit	gut und leicht zu bearbeiten
	Natürlicher Bodenwert	mittelwertiges Ackerland

Die Tabelle 6 beschreibt den Boden des Standortes Lichtenwörth. Das Feld befindet sich in einer Ebene in der Nähe von Wr. Neustadt. Es handelt sich bei diesem Bodentyp um einen Tschernosem, welcher aus feinem und grobem Schwemmmaterial besteht. Dieser Bodentyp kommt hauptsächlich im Wiener Becken vor.

Der Boden gliedert sich in drei Horizonte. Der oberste Horizont A_{1p} setzt sich aus sandigem Lehm oder sandigem Schluff mit geringem bis mäßigem Schotter- und Kiesanteil zusammen. Der zweite Horizont A_2 besteht aus sandigem Lehm oder sandigem Schluff mit hohem bis mäßigem Schotter- und Kiesanteil. Im Horizont D sind Schotter und Kies dominierend. Aufgrund dieses Aufbaues mit einem D-Horizont aus Schotter und Kies kann die schlechte Wasserspeicherfähigkeit und die damit einhergehende Trockenheitsgefährdung erklärt werden. Der Boden ist stark kalkhaltig und weist im A_{1p} und A_2 mittelhumose bis humose Humusverhältnisse auf.

Durch die Lage in einer Ebene mit wenig Wald und Hecken ist dieser Standort aufgrund seines Bodens und des Klimas für die Winderosion mäßig anfällig. Dieses Feld wird als mittelwertiges Ackerland beschrieben.

Allgemeine Beschreibung des Tschernosems:

Der Name Schwarzerde ist die deutsche Bezeichnung für den Tschernosem Russlands. Das Profil des Tschernosems setzt sich aus einem Ah/C-Boden aus Lockergestein mergeliger Zusammensetzung mit einem über 40 cm mächtigen, dunklen „Mull-Ah“ Horizont zusammen. Durch Bioturbation sind teilweise metertiefe dunkle Schichten entstanden.

Tschernoseme sind in Europa vorwiegend aus Löss entstanden. Für die Entwicklung des Tschernosemes müssen bestimmte Faktoren und Ausgangsgesteine gegeben sein. Die Ausgangsgesteine sind kalkhaltig, wobei für eine Entstehung dieses Bodentyps noch Faktoren wie etwa die der Bioturbation eine große Rolle spielen. Der Einfluss eines kontinentalen, semiariden bis semihumiden und sommertrockenen Klimas muss für die Entstehung eines Tschernosemes vorhanden sein. In den Randgebieten von Tschernosemen können Degradationen verschiedenster Art, wie z.B. die der Tonverlagerung stattfinden. So können aus Tschernosemen Braunerde-Tschernosemen, Parabraunerde-Tschernosemen und Tschernosem Parabraunerden entstehen.

Tschernoseme enthalten in Mitteleuropa einen Tongehalt von ca. 15 - 20 %. Sie sind im Oberboden meist kalkfrei. Der Humusgehalt beträgt in etwa zwischen 2 - 6 % im Ah-Horizont und ist daher als hoch einzustufen. Weiters sind Schwarzerdeböden gut mit pflanzenverfügbaren Mikronährstoffen versorgt. Sie enthalten einen hohen Anteil an Mittel- und Grobporen und sind daher gut durchwurzelbar und durchlüftet. Löss-Schwarzerden können im oberen Meter mehr als 200 mm Niederschlag nutzbar speichern und sind somit auch in Trockenperioden in der Lage die Pflanzen mit ausreichend Wasser zu versorgen.

Tschernoseme sind sehr fruchtbare Böden und zeichnen sich daher als gute Ackerstandorte aus (vgl. BLUME et al., 2010, 319).

3.3.2. Wulkaprodersdorf

Betrieb Maria und Ing. Markus Fröch

Kleinfrauenhaid 2A, 7023 Kleinfrauenhaid

Grundstücksnummer: 4406/1 und 4406/2, Katastralgemeinde: Wulkaprodersdorf 30027

Tabelle 7 Bodenkartierung Wulkaprodersdorf

Österreichische Bodenkartierung	Kartierungsbereich	183
	Bodenform	29
	Größe der Bodenform	968 ha
	Lage und Vorkommen	Verebnungen, Hänge; eben bis leicht hängig; in allen OG. mit Ausnahme von Mörbisch a. S., St. Margarethen i. B., Rust und Neufeld a. d. L.
	Bodentyp und Ausgangsmaterial	kalkarmer Tschernosem aus kalkhaltigen Feinsedimenten (Tertiär)
	Wasserverhältnisse	wechselfeucht; sehr hohe Speicherkraft
	Horizonte	A1p(20-30); A2(50-60); AC(50-70); C(100)
	Bodenart und Grobanteil	Lehm, lehmiger Ton oder Ton; geringer Grobanteil (Schotter, Kies) im A1p-Horizont
	Humusverhältnisse	A1p, A2 mittelhumos; Mull AC schwach humos; Mull
	Kalkgehalt	kalkarm bis stark kalkhaltig
	Bodenreaktion	neutral bis alkalisch über alkalisch
	Erosionsgefahr	z. T. mäßig abschwemmungsgefährdet
	Bearbeitbarkeit	Bearbeitung erschwert durch Bodenschwere, Schollen- und Schwundrissbildung, Dichtlagerungen ab 20/30 cm Tiefe möglich
	Natürlicher Bodenwert	mittel- bis hochwertiges Ackerland

Die Tabelle 7 erklärt den Boden auf dem Versuchsfeld in Wulkaprodersdorf. Dieser Boden ist ebenfalls, wie jener in Lichtenwörth ein Tschernosem. Der Acker befindet sich in der Nähe von Eisenstadt. Er ist kalkärmer als jener in Lichtenwörth, obwohl er aus kalkhaltigen Feinsedimenten entstanden ist. Dieser Bodentyp befindet sich auf ebenen bis leicht geneigten Flächen.

Der Boden setzt sich aus Lehm, lehmigem Ton und Ton zusammen, wobei im A_{1p} ein geringer Grobanteil bestehend aus Schotter und Kies vorkommen kann.

Im A_{1p} und im A₂ Horizont herrschen mittelhumose Humusverhältnisse vor, wobei die Humusart Mull ist. Dieser Boden zeichnet sich wegen seiner hohen Speicherkraft und einer sehr geringen Durchlässigkeit aus. Er ist als wechselfeucht einzustufen.

Das Ackerland kann als mittel- bis hochwertig angesehen werden. Ein Problem stellt allerdings die Bodenschwere, Schollen- und Schwundrissbildung und die Dichtelagerung dar, die ab 20/30 cm Tiefe auftreten kann. Auf den geneigten Flächen kann es zum Teil zu einer mäßigen Abschwemmungsgefahr kommen. Ein Quarzschleier, welchen man gebietsweise oberflächlich findet, kann bei der Bearbeitung und bei der Saat Probleme verursachen.

Die allgemeine Beschreibung des Bodentyps „Tschernosem“ ist bei der Erläuterung des Standortes Lichtenwörth nachzulesen.

3.3.3. Vegetationsbedingungen im Trockengebiet

Die beiden Versuchsstandorte liegen nur wenige Kilometer voneinander entfernt, wobei sich der Standort Lichtenwörth in Niederösterreich und der Standort Wulkaprodersdorf im Burgenland befindet. Hinsichtlich der Messstellen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik haben sich die nächstliegenden Messstellen, nämlich Wr. Neustadt für Lichtenwörth (Abb. 6) und Eisenstadt für Wulkaprodersdorf (Abb. 7) ergeben.

Die Witterungsbedingungen von Juli 2012 bis April 2013 sind aufgrund der geographischen Nähe an beiden Standorten relativ ähnlich. Eisenstadt weist im Winter im 30-jährigen Durchschnitt feuchtere Bedingungen auf als der Standort Lichtenwörth. Im Sommer bzw. Herbst ist genau das Gegenteil der Fall. Im Versuchszeitraum treten die besonders hohen Niederschläge im Juli 2012 hervor. In Eisenstadt wurden seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahre 1936 noch nie so hohe Niederschläge im Juli gemessen wie im Juli 2012. Es hat damit im Juli dreimal so viel geregnet, wie im langjährigen Mittel. Auch in Wr. Neustadt war der Juli mit ca. 180 mm Niederschlag sehr feucht.

Der Jänner und Februar 2013 stechen mit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen hervor. Der April war an beiden Standorten trockener als im langjährigen Mittel. In Summe betrachtet entsprechen die Niederschläge während des Versuchszeitraumes aber dem 30-jährigen Mittel.

Im Osten Österreichs war die Temperatur im Versuchszeitraum im Jahr 2012, gemessen am langjährigen Durchschnitt höher. Vor allem der Juli, August und der November waren überdurchschnittlich warm. Ungewöhnlich war der Oktober mit einem sehr frühen und heftigen Wintereinbruch am Ende des Monats. Es war anfangs auf den Bergen wärmer als im langjährigen Schnitt, jedoch lagen die Temperaturen in den Niederungen aufgrund der Inversionswetterlage im durchschnittlichen Bereich.

Der Jänner 2013 war wärmer als im langjährigen Durchschnitt, wogegen der Februar und der März kühler waren. Ungewöhnlich war die lange Kälteperiode, die Mitte März begann und bis Anfang April andauerte. Danach wurde es mit sommerlichen Temperaturen warm und so lagen die Temperaturen insgesamt über dem langjährigen Durchschnitt (vgl. ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK, 2013, s.p.).

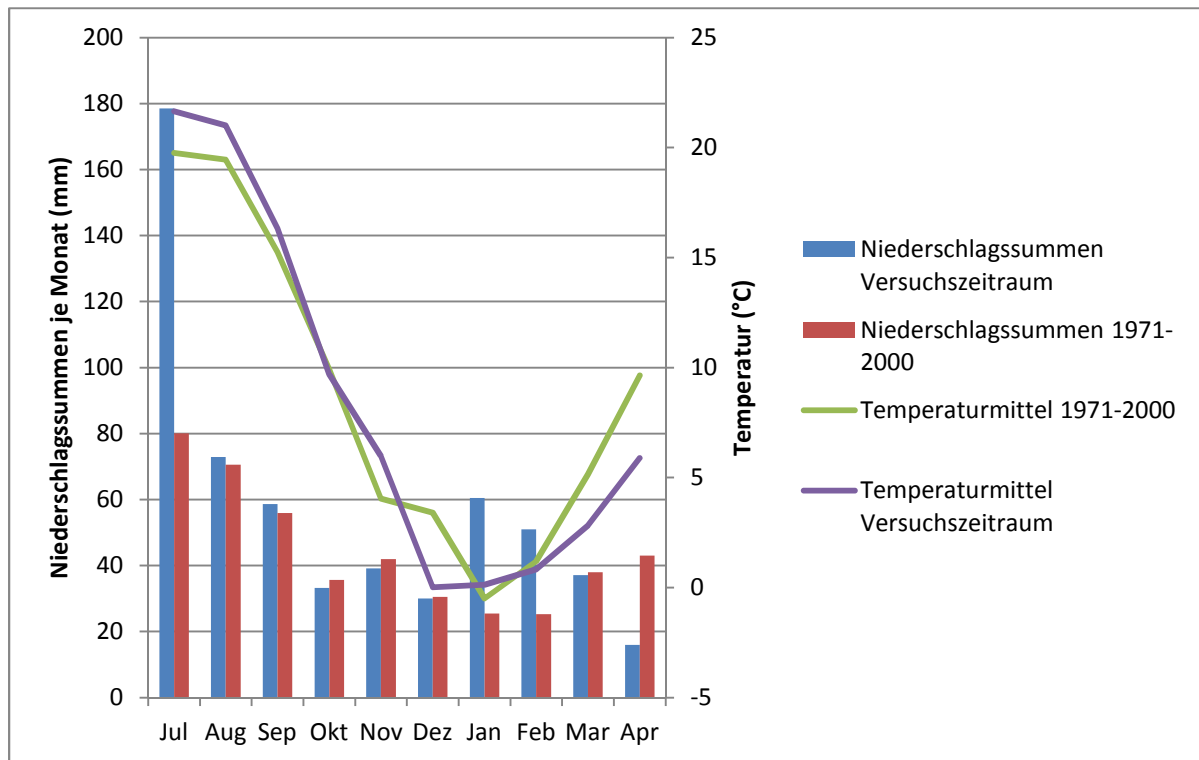


Abbildung 6 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Wiener Neustadt (Versuchsstandort Lichtenwörth)

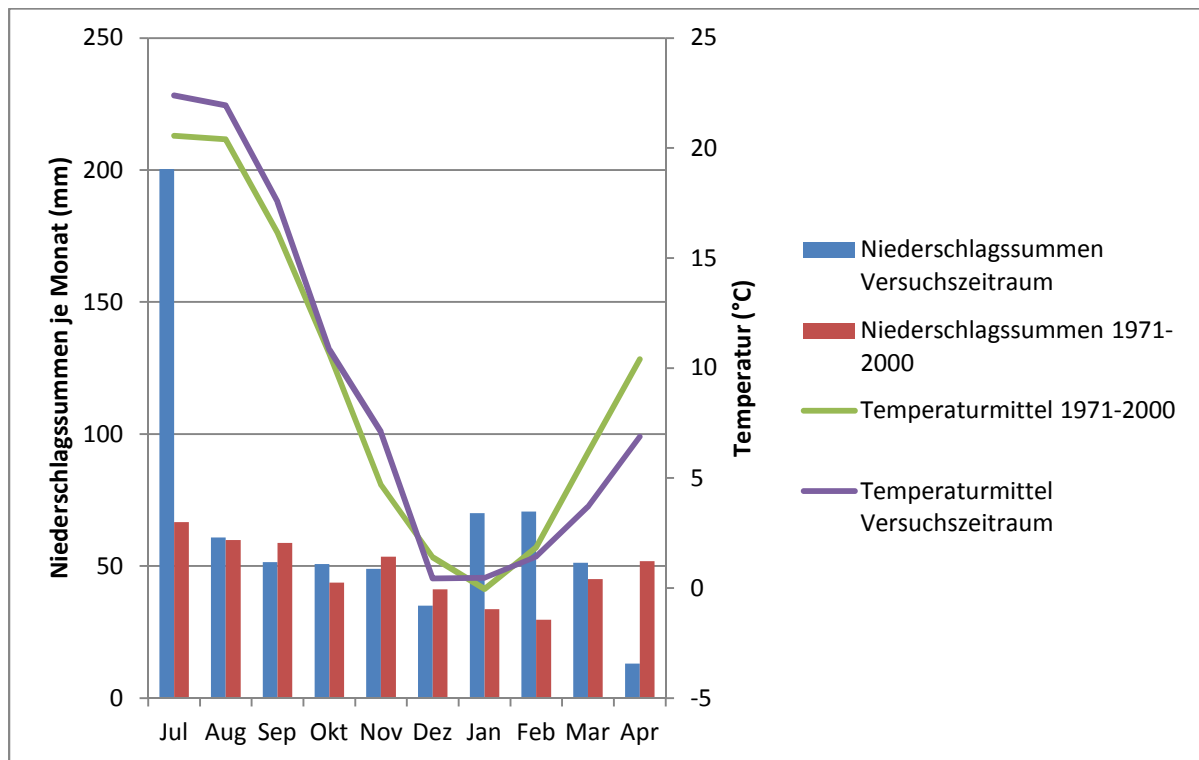


Abbildung 7 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Eisenstadt (Versuchsstandort Wulkaprodersdorf)

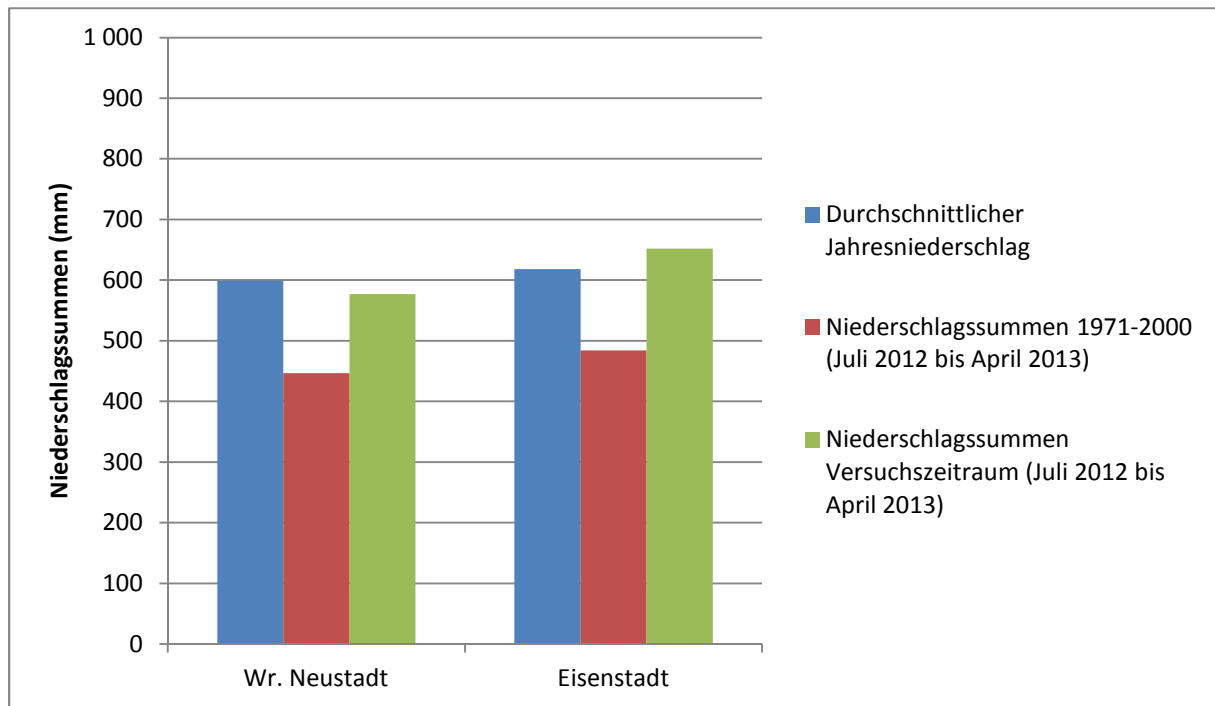


Abbildung 8 Vergleich der Niederschlagssummen an den Messstellen im Trockengebiet

Der Vergleich der beiden Messstellen der ZAMG in Wr. Neustadt und in Eisenstadt (Abb. 8) zeigt einen Vergleich bzw. eine Gegenüberstellung der Niederschlagssummen der beiden Versuchsstandorte. Hier wird deutlich sichtbar, dass die Messstelle Wr. Neustadt mehr Niederschlag aufweist, als die Messstelle in Eisenstadt. Sowohl der durchschnittliche Jahresniederschlag, als auch der mittlere Niederschlag von Juli bis April im Vergleich zum Versuchszeitraum lassen diesen Unterschied gut erkennen.

Die Monate September bis Dezember waren an beiden Messstellen bis auf den Oktober in Eisenstadt und den September in Wr. Neustadt trockener als im langjährigen Mittel. Die Temperatur war im September und November höher als im langjährigen Schnitt. Im Oktober herrschte eine Inversionswetterlage vor, wodurch die Temperaturen durch den Hochnebel über den Niederungen für die durchschnittlichen Temperaturen im Oktober verantwortlich waren. Der Dezember war im Osten kälter als im langjährigen Mittel. Im Versuchszeitraum war genügend Niederschlag für das Wachstum der Gründüngung vorhanden. Der frühe Wintereinbruch mit Frost und Schnee Ende Oktober führte jedoch zum Stillstand des Wachstums und zum teilweisen Abfrieren einzelner Mischungskomponenten wie etwa Mungo (Ramtillkraut). Der November brachte keinen Schnee und war wärmer als im langjährigen Mittel. Im Dezember fiel ein wenig Schnee. Im Jänner gab es Schneerekorde mit einer bis zu 30 cm dicken Schneedecke. Fast im ganzen Jänner war eine geschlossene

Schneedecke vorhanden. Aber auch im Februar schneite es kräftig. Jedoch taute es am Anfang und während des Monats immer wieder. Zu Beginn des März herrschte warmes frühlingshaftes Wetter vor. Nach der Monatsmitte setzte sich allerdings wieder kaltes Wetter durch, das bis in die erste Aprilwoche anhielt.

Im Versuchszeitraum waren die außerordentlichen Schnee- bzw. Niederschlagsmengen, die für den Osten Österreichs im sogenannten Trockengebiet gefallen sind, sehr ungewöhnlich. Aber auch die vielen Tauperioden und der extrem späte Frühlingsbeginn waren besonders auffällig in diesem Jahr.

3.4. Versuchsbeschreibung und -anlage

3.4.1. Versuchsanlage

Der Versuch ist als eine Streifenanlage auf landwirtschaftlichen Betrieben geplant und angelegt worden. Er besteht aus fünf unterschiedlichen Varianten (Abb. 9), die jeweils in eine gedüngte und ungedüngte Fläche unterteilt werden können. Auf dem gedüngten Teil des Versuches wurde Schweinegülle bzw. Biogasgülle mit 30 kg N/ha jahreswirksam zur Strohrotte ausgebracht und mit dem Grubber flach eingearbeitet. In Oberösterreich wurde die Anlage des Versuches Ende Juli nach der Wintergerstenernte durchgeführt. Es erfolgte eine Sommertieffurche mit anschließender Unkrautkur. Danach wurde das jeweilige Zwischenfruchtsaatgut mittels Kreiselegge und Sämaschine ausgebracht. Die Variante Senf in Reinsaat mit einer Aussaatmenge von 10 kg/ha erfolgte praxisüblich erst Mitte August. In Niederösterreich erfolgte die Saat des gesamten Versuches Ende Juli, allerdings wurde hier anstelle des Gelbsenfes ein Sareptasenf ausgesät. Der Standort Burgenland wurde aufgrund der verzögerten Ernte des Winterweizens erst Mitte August angelegt. Hier muss erwähnt werden, dass im Trockengebiet, also auf den Standorten in Niederösterreich und im Burgenland auf den Pflug verzichtet wurde.

Bei diesem Projekt handelt es sich um einen Versuch, der mit praxisüblichen landwirtschaftlichen Maschinen angelegt wurde. Deshalb war es auch gewünscht, „durchschnittliche“ landwirtschaftliche Betriebe für die Versuchsanlage zu gewinnen. Nach dem Ende der Beprobungen wurden die Versuchsflächen wieder ganz normal in den landwirtschaftlichen Produktionszyklus ohne Einschränkungen eingegliedert.

Im nachstehenden Versuchsplan (Abb. 9) kann eine detaillierte Darstellung des Versuches mit den Messpunkten betrachtet werden. Bei den einzelnen Parzellen ist die Zusammensetzung der jeweiligen Mischung zu sehen. Senf in Reinsaat ist mit 10 kg/ha ausgesät worden. Hier wurde bewusst auf eine niedrigere Menge zurückgegriffen, da sich geringere Saatstärken in der Praxis bewährt haben. Die Mischung Winterbegrünung 1 der RWA besteht aus 7 kg Phacelia und 3 kg Senf je Hektar. Bei der Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich wurden 7,5 kg/ha veranschlagt, wobei jedoch der Ölrettich mit

4 kg/ha deutlich überwiegt. Mit 12 kg/ha wurde die Mischung Wassergüte früh ausgebracht. Sie ist die einzige Mischung in diesem Versuch, welche eine Leguminose und keine Kreuzblütler enthält. Der Anteil der Leguminose Alexandrinerklee überwiegt mit 8 kg/ha in dieser Mischung deutlich.

Da eine Anlage als vollständig randomisierter Versuch nicht möglich war, erfolgte die Anlage als Streifenversuch mit einer Beprobung entlang eines Linientranssektes (Abbildung 9). Damit kann mittels geostatistischer Methoden (Autokorrelation) festgestellt werden, ob die einzelnen Messpunkte in einem räumlichen Zusammenhang stehen oder als unabhängige Wiederholungen zu sehen sind. Dementsprechend kann eine Auswertung der Faktoreinflüsse über erweiterte geostatistische Verfahren oder eine klassische Varianzanalyse erfolgen.

Für die Beprobung der verschiedenen Parameter sind jeweils drei Messpunkte pro Parzelle festgelegt worden. Da die einzelnen Parzellen 6 m breit sind, haben sich die Messpunkte an einem, drei und fünf Meter je Parzelle ergeben. Bei allen Parametern die beprobt worden sind, wurden diese Abstände bei der Probennahme strikt eingehalten. An der unteren Seite des Planes kann man blaue Punkte erkennen, wobei diese wiederum auf einer strichlierten Linie liegen. Bei der Durchführung der verschiedenen Untersuchungen „wanderte“ die Beprobungsmannschaft von der einen Seite des Versuches zur anderen, also von der ungedüngten Brache zur gedüngten Wassergüte früh-Parzelle (Abb. 9).

Die $N_{\min}$ -Beprobung im Herbst und im Frühjahr wurde versetzt, d.h. an unterschiedlichen „Linien“ in einem Abstand von etwa 3 Metern quer über den Versuch durchgeführt, um den durch die Probennahme veränderten Bodenbedingungen auszuweichen.

Die Rohre für die Messung der Lachgas- und Kohlendioxidemissionen wurden hingegen auf denselben Stellen belassen, wo sie im Herbst 2012 eingeschlagen worden sind.

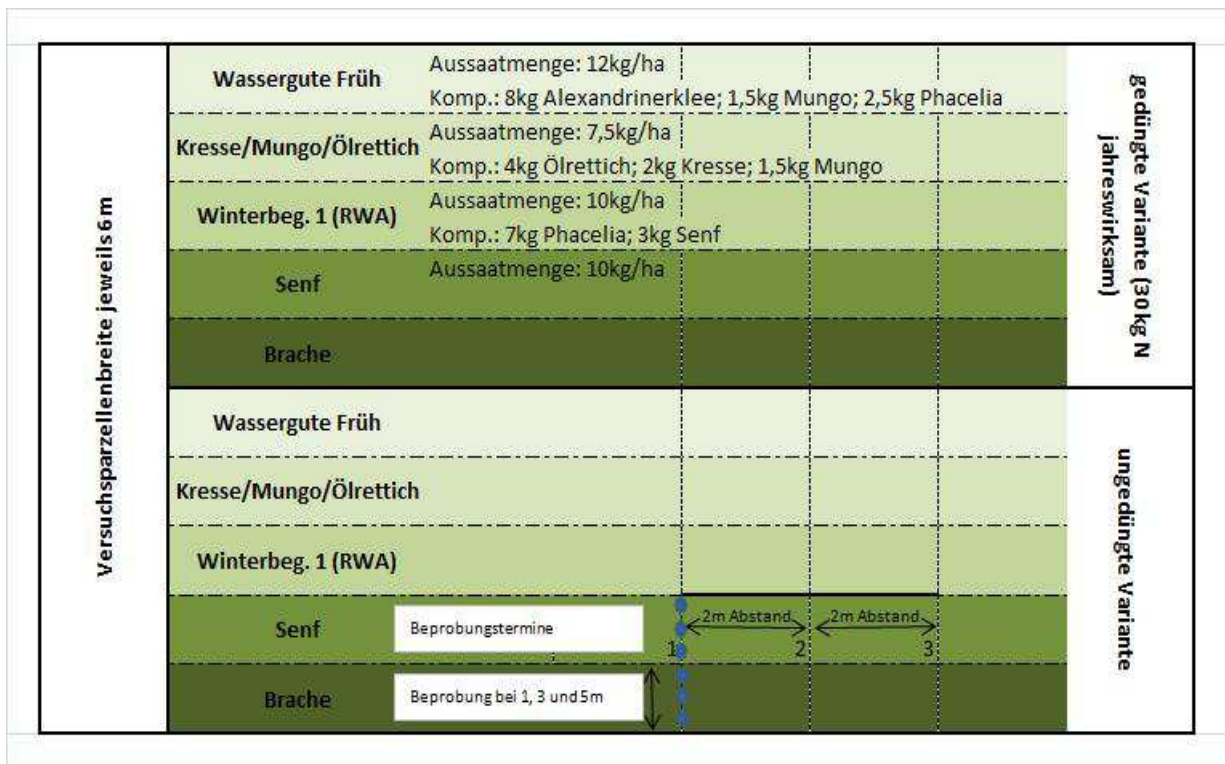


Abbildung 9 Versuchsplan

3.4.2. Beschreibung der Versuchsvarianten (Zwischenfruchtmischungen)

Schwarzbrache

Die Schwarzbrache ist für diesen Versuch als Kontrollvariante angelegt worden. Sie fällt aus der ÖPUL-Maßnahme „Begrünung von Ackerflächen“ heraus. Mittlerweile ist man von der Schwarzbrache abgegangen, da sie den mineralisierten Stickstoff aus dem Boden nicht aufnehmen kann. Weiters fördert eine Schwarzbrache die Verunkrautung des Feldes. Sie wird deshalb nur nach sehr spät geernteten Kulturen wie z.B. nach Mais, Zuckerrübe, Soja und Sonnenblume angelegt, da eine Aussaat von Zwischenfrüchten im Herbst keinen ausreichenden Bestand mehr hervorbrächte.

Die Verunkrautung der Schwarzbrache war auf allen Standorten mäßig bis stark und so wurde eine mechanische Unkrautbekämpfung Anfang Oktober durchgeführt, um die Kontrollvariante im optimalen Zustand erhalten zu können.

Senf in Reinsaat

Den Senf in Reinsaat auszusäen ist beim derzeitigen ÖPUL möglich, jedoch wird es beim nächsten ÖPUL diese Variante im Zuge der steigenden Ökologisierungsmaßnahmen (Greening) wahrscheinlich nicht mehr geben. In der Praxis wird jedoch meistens eine zweite Komponente mit einem geringeren Anteil hinzu gemischt. Die Anlage von Senf in Reinsaat bzw. die Verwendung von nur einer Komponente ist in den ÖPUL-Varianten A, A1 und B möglich. Die Variante A beinhaltet abfrostende sowie winterharte Begrünungskulturen. Hingegen beziehen sich die Varianten A1 und B ausschließlich auf abfrostende Arten.

In der Praxis beläuft sich die Saatstärke auf 15 kg/ha, wobei in diesem Versuch nur 10 kg/ha verwendet wurden. Eine Reduktion der Saatstärke führt zu schöneren Beständen, die Einzelpflanzen werden kräftiger, breiten sich mehr aus und füllen rascher die Zwischenräume.

Die Verwendung von nematodenresistentem Senf bewirkt bei rechtzeitigem Anbau, den Entwicklungszyklus der Nematoden in Zuckerrübenfruchtfolgen zu hemmen oder zu stoppen.

Senf eignet sich auch sehr gut bei späten Saaten. Er kann auf die grobe Scholle beispielsweise mittels Kleinsamenstreuer ausgebracht werden (vgl. WALLNER, s.a., 7). Beim Senf muss zwischen verschiedenen Arten unterschieden werden. In diesem Versuch wurde in Oberösterreich ein „herkömmlicher“ Gelbsenf (*Sinapis alba*) verwendet. Dieser wurde wie schon beschrieben erst Mitte August ausgebracht im Gegensatz zu den anderen Mischungen, welche Ende Juli gesät worden sind. In Niederösterreich und dem Burgenland hingegen wurde ein Sareptasenf (*Brassica juncea*) verwendet. Der Sareptasenf würde sich als Zwischenfrucht gut eignen, jedoch ist er im Gegensatz zum Gelbsenf sehr teuer.

Winterbegrünung 1 der RWA

Diese Mischung der RWA kann als eine Standardmischung betrachtet werden, da sie aus den Bestandteilen Gelbsenf und Phacelia zusammengesetzt ist. 10 kg dieser Mischung bestehen aus 3 kg Senf und 7 kg Phacelia. Sie sollte bis spätestens Mitte August gesät werden, um eine

gute Bedeckung des Bodens erzielen zu können. Die Mischung Winterbegrünung 1 ist abfrostend und erfüllt damit die Voraussetzungen der Variante D des ÖPULs. Bei rechtzeitigem Anbau wirkt sich diese Mischung hemmend im Bezug auf Nematoden aus. Die Aussaatmenge wird mit 7-8 kg/ha veranschlagt. Es ist eine preisgünstige Mischung, die für alle Lagen geeignet ist. Vor allem aber im Trockengebiet sichert sie eine rasche Bodenbedeckung und gute Durchwurzelung. Bei der im nächsten Jahr stattfindenden Saat kann die Mulch- und Direktsaat angewendet werden (vgl. RWA, s.a., 2).

Mischung aus Kresse, Mungo und Ölrettich

Die Mengenanteile bzw. die Komponenten dieser Mischung aus Kresse, Mungo (Ramtillkraut) und Ölrettich wurden gemeinsam mit den Projektpartnern festgelegt. Sie ist als Variante D für das ÖPUL verwendbar und zählt als abfrostende Mischung. Für die Bestellung eines Hektars werden 7,5 kg gerechnet. Diese setzen sich aus 4 kg Ölrettich, 2 kg Kresse und 1,5 kg Mungo (Ramtillkraut) zusammen. Die Kresse sollte als möglicher Bestandteil in einer Mischung getestet werden. Allerdings muss bei dieser Mischung der doch relativ hohe Anteil von 4 kg Ölrettich beachtet werden.

Die Kresse hat eine sehr gute unkrautunterdrückende Wirkung. Sie legt sich nach dem Absterben schön über den Boden und lässt somit nur wenig Licht auf die Bodenoberfläche gelangen und unterdrückt daher die Keimung der Unkräuter. Sie ist auch für schwere bzw. nasse Böden geeignet und wenig trockenheitsempfindlich (vgl. WALLNER, s.a., s.p.).

Die Kresse in dieser Mischung hat sich im Zuge dieses Projektes nicht bewährt, da sie von den anderen Mischungspartnern oftmals stark unterdrückt worden ist und sie folglich nur einen geringen Beitrag ihrer Eigenschaften in die Mischung einfließen lassen konnte. Am Standort Ort/Innkreis wurden zwei verschiedene Sorten auf einer Fläche von wenigen Quadratmetern in Reinsaat versuchsweise mit der Hand ausgesät, um die Entwicklung der Kresse in Reinsaat im Gegensatz zu jener in der Mischung zu beobachten. Dabei wurde festgestellt, dass sich der abgestorbene Pflanzenbestand, wie schon oben beschrieben, gut als Schutz gegenüber der Verunkrautung und der Erosion des Feldes bewährt. Bezüglich der

beiden Sorten konnten am toten Pflanzenmaterial keine Unterschiede hinsichtlich der Entwicklung wahrgenommen werden.

Laut einer anderen Beschreibung aber eignet sich Kresse in Reinsaat nicht. Lediglich in Mischungen mit Klee soll sie eine bessere Bodenbedeckung erreichen. Sie muss dann aber anstatt mit dem Schneckenkorn- oder Düngerstreuer mit der Sämaschine ausgebracht werden. Noch hervorzuheben ist, dass obwohl die Kresse ein Kreuzblütler ist, bisher noch keine Infektionen mit Kohlhernie beobachtet wurden und sie deshalb vor allem für rapsbetonte Fruchtfolgen von Vorteil ist (vgl. STADLER, s.a., 9).

Wassergüte früh

Die Mischung Wassergüte früh ist eine Mischung der Saatbau Linz, die in Zusammenarbeit mit der Oö. Wasserschutzberatung für die durch Nitratauswaschungen gefährdeten Gebiete in Oberösterreich konzipiert worden ist. Diese Mischung ist wie die oberen beiden der Variante D des ÖPULs zuzurechnen. Sie ist für alle Fruchtfolgen verwendbar, da sie keine Kreuzblütler enthält und somit der Verbreitung von Krankheiten bei Kreuzblütlern Einhalt gebietet bzw. diese verringert. Die Aussaat dieser Mischung sollte bis Anfang August durchgeführt werden, da ansonsten ein verspäteter Saattermin nicht mehr den gewünschten positiven Effekt erbringen würde. Bezüglich des Saatbeetes wirkt sich ein eher feines und gut abgesetztes Saatbeet erfolgreich auf die Entwicklung des Bestandes aus. Die Aussaat sollte leicht erfolgen (vgl. SAATBAU LINZ, s.a., s.p.).

Für die Bestellung eines Hektars wird eine Packung, das sind 12 kg, angegeben. Diese 12 kg setzen sich wiederum aus 8 kg Alexandrinerklee, 2,5 kg Phacelia und 1,5 kg Ramtillkraut (Mungo) zusammen. Damit ist das Mischungsverhältnis gut abgestimmt. Die Mischung zeichnet sich durch ihre gute Unkrautunterdrückung besonders aus, jedoch wie schon erwähnt muss die Anlage bis spätestens Anfang August erfolgen. Der Alexandrinerklee ist teilweise dem Schneckenfraß ausgesetzt, was sich aber nicht dramatisch auf die Etablierung der Mischung auswirkt. Des Weiteren ist diese Mischung, wie alle anderen auch abfrostend. Sie ist als besonders frostempfindlich einzustufen, da der Mungo (Ramtillkraut) bei Temperaturen um den Gefrierpunkt bereits abstirbt (vgl. WALLNER, s.a., 12).

4. Datenerhebung

4.1. Messmethoden der einzelnen Parameter

Die Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die Parameter, die im Zuge des Versuches untersucht wurden. Außerdem kann die Methode, mit welcher die Daten erhoben wurden, nachvollzogen werden. Des Weiteren kann der Zeitpunkt der Messung des jeweiligen Parameters und der Standort, an dem die Probennahme stattfand, abgelesen werden.

Tabelle 8 Messmethoden

Parameter	Methode	Messzeitpunkt	Messort
Gasförmige Emissionen (CO₂, N₂O, CH₄)	Closed Chamber Method	22.11.2012, 28.11.2012, 01.02.2013, 06.03.2013, 07.03.2013, 09.04.2013, 15.05.2013	Lichtenwörth, Pötting
Bodenfeuchte	Vitel Hydra Probe	22.11.2012, 28.11.2012, 01.02.2013, 06.03.2013, 07.03.2013, 09.04.2013, 15.05.2013	Lichtenwörth, Pötting
Bodentemperatur	Vitel Hydra Probe	22.11.2012, 28.11.2012, 01.02.2013, 06.03.2013, 07.03.2013, 09.04.2013, 15.05.2013	Lichtenwörth, Pötting
N_{min}	Photometrisch	Anfang November, Anfang März, Anfang April	Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf, Pötting, Ort/Innkreis, Bad Wimsbach-Neydharting
DOC	Photometrisch	22.11.2012, 28.11.2012, 01.02.2013, 06.03.2013	Lichtenwörth, Pötting
Pflanzenbiomasse	Trockenmasse (105°C)	Anfang November	Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf, Pötting, Ort/Innkreis, Bad Wimsbach-Neydharting
N-Gehalt Biomasse	CNS- Analyse	Anfang November	Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf, Pötting, Ort/Innkreis, Bad Wimsbach-Neydharting

4.1.1. Biomasseaufwuchs (Oberirdische Trockenmassebildung)

Bei der $N_{\min}$ -Beprobung im Herbst wurde an allen Standorten wiederum an den drei Punkten je Variante die oberirdische Biomasse von einem Quadratmeter abgeerntet. Hierzu wurde ein Metallrahmen auf den Boden gelegt, die Biomasse mit gewöhnlichen Gartenschere abgeschnitten und in Papiersäcken verpackt. Im Anschluss daran erfolgten aufgrund der hohen Grünmassemengen eine Vortrocknung und erst dann die Trocknung bei 105°C im Trockenschrank. Diese Trocknung erfolgte so lange, bis keine Gewichtsabnahme mehr feststellbar war.

Die getrocknete Biomasse wurde dann verwogen, um den Trockenmasseaufwuchs der einzelnen Zwischenfruchtvarianten ermitteln zu können.

4.1.2. Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt in der oberirdischen Biomasse

Die getrocknete Biomasse des Zwischenfruchtaufwuchses wurde für die Stickstoff- und Kohlenstoffgehaltsermittlung in der Pflanzenmasse mit speziellen Mühlen vermahlen und in Probensäckchen abgepackt. Die Analyse des Nährstoffgehaltes erfolgte am UFT Tulln.

Die CN-Analyse erfolgt nach der Dumas Methode. Hierbei wird eine genau verwogene Menge der Pflanzenmasse bei 1150°C unter Sauerstoffeinfluss verbrannt. Durch die Verbrennung werden feste Bestandteile in gasförmige Stoffe übergeführt. Die Gasmixtur wird gereinigt, nach Komponenten getrennt und anschließend die Einzelbestandteile bestimmt. Für diese Bestimmung wird die Zusammensetzung der Gasprobe mit einer bekannten Probe verglichen und über eine Software können die Inhaltsstoffe berechnet werden.

4.1.3. Gasförmige Emissionen

Die Durchführung der Gasmessungen erfolgte auf den Standorten Pötting in Oberösterreich und in Lichtenwörth in Niederösterreich. So waren für diese Untersuchung sowohl das Feucht- als auch das Trockengebiet vertreten.

Die Beprobung wurde über den gesamten Versuch durchgeführt und es wurden auch wieder die für die Transektmethode erforderlichen Abstände eingehalten. So wurde je Variante pro Termin dreimal beprobt bei insgesamt vier Messterminen. Diese Termine wurden im Herbst und Frühjahr an die Entnahme der Bodenproben geknüpft und im Winter an das Auftreten von Tauperioden. Laut Literatur können gerade bei tauender Witterung erhebliche Emissionen festgestellt werden.

Für die Messungen wurden auf den zu beprobenden Flächen 10 cm lange PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 20 cm zur Hälfte in den Boden eingeschlagen. Das PVC-Rohr bildete somit den Messbereich für die bodenbürtigen Emissionen. Das Rohr wurde mit einem selbstgebauten Deckel verschlossen. Der Deckel besteht aus einem handelsüblichen Blumentopfuntersetzer, welcher mit einer Fensterdichtung versehen wurde. Diese Dichtung stellt sicher, dass zwischen dem Rohr und dem Deckel kein Gas entweichen kann.

Durch den Verschluss der Rohre mit dem Deckel beginnt schließlich die Messung. Hier werden dann jeweils zur Minute 0 als Messbeginn, sowie Minute 15 und 45 Gasproben mit einer 20 ml-Spritze entnommen und in ein vakuumiertes Probenröhrchen gefüllt. Die Messung zur Minute 0 stellt einen Nullwert dar und gibt Aufschluss über die natürliche atmosphärische Konzentration der zu untersuchenden Gase. Die beiden anderen Werte geben Aufschluss über die aus dem Boden emittierte Menge an Gasen, wodurch sich der Gasfluss pro Zeit- und Flächeneinheit ermitteln lässt. Die Auswertung der Gase erfolgt in einem Gaschromatographen am Institut für Bodenforschung. Bei der Analyse der Proben werden zusätzlich zu Lachgas außerdem noch Methan und Kohlendioxid gemessen.

Bei der Gaschromatographie wird das Gas-Luftgemisch, welches sich in den Probenröhrchen befindet, in seine einzelnen chemischen Verbindungen getrennt. Für die Bestimmung werden Inertgase wie Stickstoff oder Helium verwendet. Bevor die Analyse der unbekannten Proben durchgeführt werden kann, muss der Chromatograph einige Proben mit einer

bekannten Konzentration analysieren. Die Analyse erfolgt über eine Verbrennung des Gasgemisches, wobei die Zeitpunkte, wo die einzelnen Stoffe verbrennen bekannt sind und genau in diesem Zeitraum eine Aufzeichnung der Menge erfolgt. Über den Vergleich mit den bekannten Proben kann nun eine Aussage über den Gehalt an Gasen getroffen werden. Zum Schluss der Analyse erfolgt noch eine manuelle Anpassung und Kontrolle der Chromatogramme, um schließlich die Gasmengen zu erhalten.

Zur Interpretation beziehungsweise zur Berechnung des Gasflusses müssen neben den Gasproben auch noch verschiedene andere Messwerte erhoben werden. So müssen sowohl die Lufttemperatur im Messzeitraum als auch das Volumen des eingeschlagenen PVC-Rohres für die Berechnung dokumentiert werden.

4.1.4. Mineralisierter Stickstoff im Boden ($N_{\min}$)

Mit der Bestimmung des mineralisierten Stickstoffes werden die für die Pflanzen leicht verfügbaren Stickstoffvorräte im Boden ermittelt, wobei sowohl Nitrat- als auch Ammoniumstickstoff von der Untersuchung erfasst werden.

Bevor die Aussaat der Zwischenfrüchte erfolgte wurde eine Mischprobe zur Bestimmung des $N_{\min}$ -Gehaltes (Vorsaat- $N_{\min}$) an allen 5 Standorten genommen, um einen Vergleichswert für die spätere Interpretation der Ergebnisse von den $N_{\min}$ -Probennahmen im Herbst und im Frühjahr zu erhalten.

Die $N_{\min}$ -Proben wurden Anfang November in Ober- und Niederösterreich und im Burgenland durchgeführt. Der Termin für die $N_{\min}$ -Probenziehung erfolgte aus Gründen der schon relativ geringen Tätigkeit der Mikroorganismen im Boden, des eingestellten Wachstums der Pflanzen und der damit einhergehenden fehlenden Stickstoffaufnahme aus dem Boden zu Vegetationsende. Die zweite Probennahme zu Vegetationsbeginn im Frühjahr erfolgte in Niederösterreich und im Burgenland Anfang März und in Oberösterreich aufgrund der anhaltend schlechten Witterung Anfang April. Die Proben wurden mittels Bodenbohrer in zwei Tiefenstufen von 0 - 30 cm und 30 - 60 cm entnommen und in beschriftete Probensäckchen verpackt. Im Anschluss wurden die Proben sofort tiefgekühlt und ins Labor transportiert.

Die $N_{\min}$ -Analysen für die Bestimmung des Gehaltes an mineralisiertem Stickstoff im Frühjahr und Herbst von allen fünf Standorten wurden vom landwirtschaftlichen Labor CEWE GmbH in Nußbach, Oberösterreich durchgeführt.

Die begleitenden $N_{\min}$ -Analysen für die Gasbeprobung in Pötting und Lichtenwörth wurden vom Labor der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf durchgeführt. Die Analyse erfolgte mit der Fließ-Injektionsanalyse „FIAstar 5000². Aus den Bodenproben wird ein Filtrat hergestellt und mittels eines Photometers wird die Lichtabsorption gemessen (Nitrat 540 nm und Ammonium 590 nm). Durch den Vergleich mit einer bekannten Lösung können über eine Software die Ergebnisse berechnet werden.

4.1.5. Bodenfeuchtigkeit und -temperatur

Zur Interpretation der Ergebnisse werden auch die Bodenfeuchtigkeit und die Bodentemperatur in der oberen Bodenschicht (0 - 5 cm) genau erfasst. Die Messung erfolgte mittels FDR-Sensor (Vitel Hydra Probe), der sowohl den volumetrischen Wassergehalt als auch die Bodentemperatur misst.

4.1.6. DOC

Um die gasförmigen Emissionen besser erklären beziehungsweise interpretieren zu können, wurden auch Bodenproben für die Bestimmung des gelösten organischen Kohlenstoffes (dissolved organic carbon, DOC) im Boden entnommen. Die Proben wurden in Plastiksäcke abgefüllt und unverschlossen luftgetrocknet.

Die Analyse erfolgte am Institut für Bodenforschung. Hierbei wird der Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff mittels UV-Licht-Absorption bei 254 Nanometer ermittelt. Dazu wird von den Proben jeweils eine genau definierte Menge entnommen und mittels entkeimtem Wasser gelöst. Nach einem einstündigen Schüttelvorgang wird ein Filtrat hergestellt und bei diesem die UV-Absorption gemessen.

4.2. Statistische Auswertung

Die Anlage der Versuche auf landwirtschaftlichen Betrieben unter Praxisbedingungen und mit den jeweils vorhandenen Maschinen und Geräten erlaubte hinsichtlich des Versuchsaufbaues keine randomisierte Versuchsanlage. Daher erfolgten die Messungen entlang einer Linie im Abstand von 2 Meter zueinander. In diesem Transekt ergaben sich aufgrund des streifenförmigen Versuches jeweils 3 Beprobungspunkte (unechte Wiederholungen) je Parzelle. Diese Probenentnahme ermöglicht die Darstellung von Korrelationen zwischen den Punkten mittels einer Autokorrelationsanalyse. Wurden hier Zusammenhänge festgestellt, konnten diese mit geostatistischen Verfahren noch genauer betrachtet werden (vgl. NIELSEN und WENDROTH, 2003, s.p.).

Die Autokorrelationsanalyse beruht darauf, dass benachbarte Werte innerhalb einer Parzelle eng miteinander in Beziehung stehen und mit zunehmender Entfernung diese Beziehung geringer wird. Konnte kein signifikanter Trend festgestellt werden, so konnten die unechten Wiederholungen varianzanalytisch berechnet werden, ohne von einem Bodentrend systematisch beeinflusst zu sein. Generell konnten wir keinen Bodentrend in der Datenauswertung feststellen. Gerade bei der Messung der gasförmigen Emissionen wurde sehr deutlich das Fehlen einer räumlichen Korrelation festgestellt. Dies beruht darauf, dass die räumliche Variabilität bei den gasförmigen Emissionen sehr groß ist (vgl. PARKIN, 1987, 1194).

Deshalb wurden diese Daten als räumlich nicht zusammenhängend betrachtet und mittels einer Varianzanalyse auf Variantenunterschiede getestet. Weiters wurde eine Joint Regression Analyse durchgeführt. Hierbei wird das Mittel der Varianten im Vergleich zu den Einzelvarianten zu den verschiedenen Zeitpunkten und Orten dargestellt. Die Kombination Zeitpunkt und Ort ist hier als „Umwelt“ zu verstehen. Zum Schluss wurde noch eine Regressionsanalyse erstellt, um Zusammenhänge zwischen dem C/N-Verhältnis, Bodenwassergehalt, Bodentemperatur, N_{min} , DOC und den gasförmigen Emissionen erkennen zu können.

Alle statistischen Analysen wurden mit SAS 9.1 mit PROC MIXED für Varianzanalyse und PROC REG für die Regressionsanalyse erstellt. Die Autokorrelationsanalyse wurde ebenfalls

mit SAS (Time Series Viewer, PROC AUTOREG) durchgeführt. Die Mittelwertsvergleiche wurden mit einem t-Test errechnet.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Biomasseaufwuchs (Oberirdische Trockenmassebildung)

Die Entwicklung der Begrünungsbestände war an allen Standorten aufgrund der Niederschläge in den Monaten August und September sehr gut. Die Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse der Varianzanalyse.

Tabelle 9 Varianzanalyse Oberirdische Biomasse

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Ort	4	55,69	< 0,0001
Düngung	1	0,24	0,6227
Ort*Düngung	4	2,43	0,0643
Variante	3	9,10	< 0,0001
Variante*Ort	12	6,41	< 0,0001
Variante*Düngung	3	2,70	0,0509
Variante*Ort*Düngung	12	0,74	0,7130

Betrachtet man die Varianzanalyse, lässt sich feststellen, dass die Varianzursachen Ort und Variante sowie die Wechselwirkung Variante*Ort signifikant sind. Aufgrund der knappen Signifikanz der Wechselwirkung Variante*Düngung wird diese ebenfalls dargestellt. Im Folgenden werden aufgrund des starken Ortseffektes zuerst die Ergebnisse der Erhebung der oberirdischen Biomasse der einzelnen Varianten getrennt nach den Orten dargestellt und diskutiert.

5.1.1. Ort im Innkreis (Feuchtgebiet)

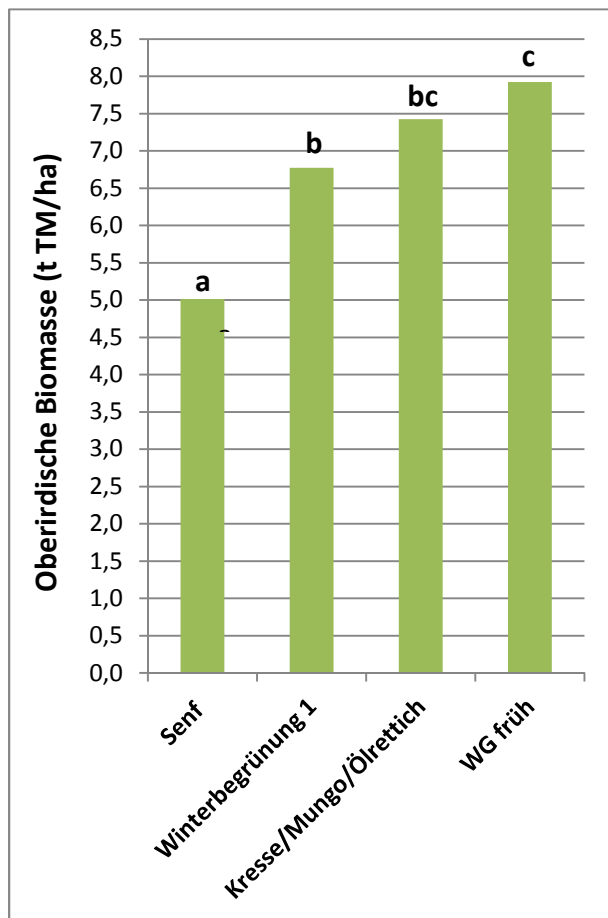


Abbildung 10 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Ort/Innkreis. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Die Biomasseaufwüchse am Standort Ort/Innkreis sind als sehr gut bis überdurchschnittlich zu bezeichnen. Wie in Abbildung 10 dargestellt, schwanken die Aufwüchse im Mittel der Düngung in einem Bereich von 5,0 bis 7,9 Tonnen Trockenmasse je Hektar. Die Niederschlagsverteilung für den Standort zeigt, dass die Niederschläge in den Monaten August und September im Schnitt der letzten 30 Jahre lagen. Beobachtet man die Witterung nach der Saat der Begrünung genauer, so kann man feststellen, dass durch regelmäßige Niederschläge eine optimale Jugendentwicklung stattfand.

Den geringsten Aufwuchs mit 5,0 Tonnen Trockenmasse erzielte die Variante Senf. Hier bestehen signifikante Unterschiede zu den anderen Varianten. Bei diesem Ergebnis ist zu beachten, dass der Senf in Reinsaat aufgrund der Praxisüblichkeit in der Landwirtschaft erst Mitte August gesät wurde und somit gegenüber den anderen Varianten eine um 2 Wochen kürzere Vegetationszeit hatte. Diese Tatsache zeigt, dass ein rechtzeitiger Saattermin einen hohen Trockenmasseaufwuchs garantiert. Auch waren hier sicherlich die Mischungen mit mehreren Komponenten deutlich im Vorteil und erbringen höhere Biomasseaufwüchse. Die Variante Winterbegrünung 1 unterscheidet sich statistisch gesehen nicht von der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich. Diese Variante wiederum unterscheidet sich nicht von der Mischung Wassergüte früh, aber von der Variante Winterbegrünung 1.

Der Effekt der Düngung am Standort Ort im Innkreis ist statistisch nicht signifikant. Der mittlere $N_{\min}$ -Gehalt vor der Saat betrug 50 kg Stickstoff je Hektar. Es konnten zwar in der gedüngten Variante etwas höhere Trockenmasseaufwüchse erzielt werden, aber ein signifikanter Unterschied besteht hier nicht. Da die Düngung auf die Getreidestoppel durchgeführt und im Anschluss mit einem Grubber seicht eingearbeitet wurde, wird der Stickstoff hier für die Strohrotte herangezogen.

Die höchsten Trockenmasseaufwüchse von 7,9 Tonnen zeigte die Mischung Wassergüte früh. Hier ist möglicherweise auch der Effekt der Leguminose Alexandrinerklee auf die Mischung zu erkennen, welche über die symbiontische Stickstofffixierung den anderen Pflanzen ausreichend Bodenstickstoff hinterlässt.

5.1.2. Pötting (Feuchtgebiet)

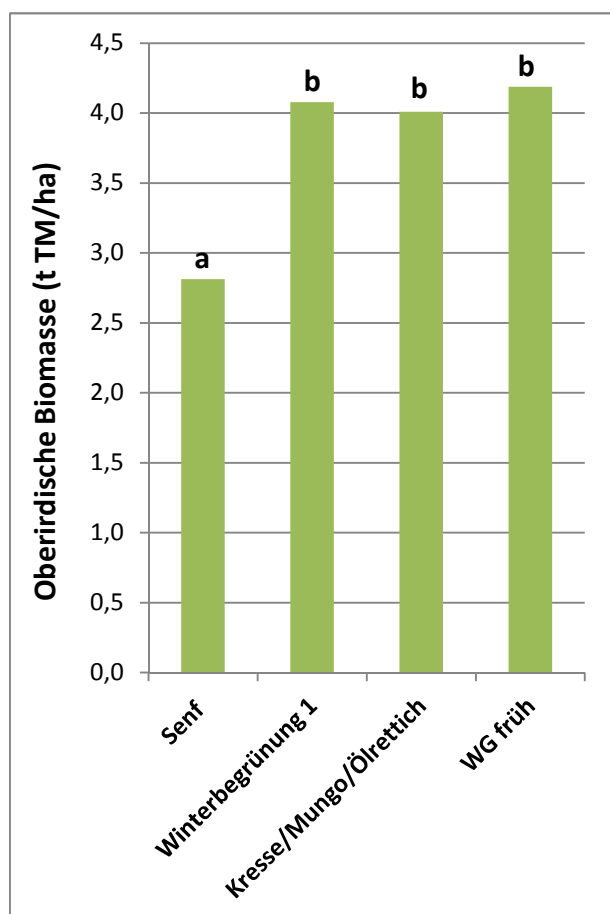


Abbildung 11 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Pötting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Am Standort Pötting konnten im Mittel der gedüngten und ungedüngten Parzellen 2,8 bis 4,2 Tonnen Trockenmasse je Hektar erzielt werden (Abbildung 11). Somit liegt dieser Versuchsstandort deutlich unter jenem in Ort im Innkreis, allerdings auf einem ähnlichen Niveau wie jener in Bad Wimsbach – Neydharting. Die Aufwüchse am Standort Pötting entsprechen jenen, die man auch in der Literatur und in verschiedenen Versuchsberichten findet.

Den geringsten Aufwuchs lieferte die Variante Senf mit 2,8 Tonnen Trockenmasse je Hektar im Mittel der Düngung. Dieses Ergebnis ist auch in Ort im Innkreis zu beobachten. Es kann also in Pötting auch davon ausgegangen werden,

dass der spätere Saattermin geringere Trockenmasseaufwüchse zur Folge hat.

Vergleicht man nun die gedüngten und ungedüngten Varianten miteinander, so ist ebenfalls kein Düngeeffekt zu erkennen. Diese nicht signifikanten Unterschiede sind sicherlich auf eine gute Versorgung des Bodens mit Nährstoffen in Form von einer regelmäßigen Wirtschaftsdüngerausbringung zurückzuführen. Dies zeigt auch der $N_{\min}$ -Gehalt vor der Saat der Zwischenfrucht im Juli mit 104 Kilogramm Stickstoff je Hektar.

Die höchsten Biomasseaufwüchse erzielten die Varianten Wassergüte früh mit 4,2 Tonnen, Winterbegrünung 1 mit 4,1 Tonnen und Kresse/Mungo/Ölrettich mit 4,0 Tonnen Trockenmasse je Hektar. Generell kann man aber sagen, dass alle drei Varianten mit Ausnahme von Senf in Reinsaat im Trockenmasseaufwuchs nur geringe Unterschiede aufweisen und daher statistisch gesehen hier keine Unterschiede bestehen.

Am Standort Pötting lässt sich kein Trend ableiten, welche Begrünung hinsichtlich des Aufwuchses zu bevorzugen ist. Klar ersichtlich ist der spätere Saattermin mit einem deutlich geringeren Aufwuchs. Die geringen Unterschiede zwischen den anderen drei Varianten zeigen, dass bei einer Auswahl der Zwischenfrucht auch auf die betriebsspezifischen Faktoren wie Fruchtfolgeplanung oder auch das folgende Bearbeitungsmanagement im Frühjahr zu achten ist, da sich hinsichtlich des Biomasseaufwuchses nur geringfügige Unterschiede ergeben.

5.1.3. Bad Wimsbach-Neydharting (Feuchtgebiet)

Am Versuchsstandort Bad Wimsbach-Neydharting (Abbildung 12) konnte im Mittel ein Biomasseaufwuchs von 3,0 Tonnen bis 4,9 Tonnen Trockenmasse je Hektar erzielt werden. Damit liegen die Biomasseaufwüchse im Schnitt aller Varianten, wie bei jenen am Standort Pötting. Den geringsten Aufwuchs mit 3,0 Tonnen Trockenmasse je Hektar erreichte wieder die Variante Senf. Es zeigt sich also auch auf diesem Standort, dass sich ein späterer Saattermin direkt auf die Aufwuchsleistung der Pflanzen niederschlägt. Der Unterschied von Senf zum Schnitt der anderen Varianten beträgt 1,2 Tonnen Trockenmasse je Hektar. Ein signifikanter Unterschied ist jedoch nur zur Variante Kresse/Mungo/Ölrettich zu erkennen.

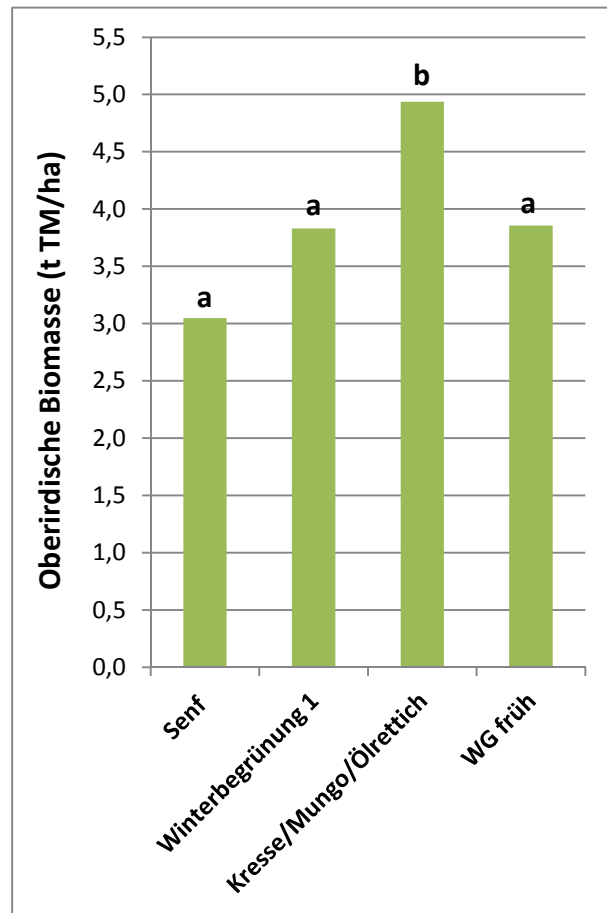


Abbildung 12 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Bad Wimsbach-Neydharting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Der Effekt der Düngung ist auch auf dieser Versuchsfläche nicht signifikant. Der Standort in Bad Wimsbach-Neydharting ist mit Nährstoffen gut versorgt, was auch der $N_{\min}$ -Gehalt vor der Versuchsanlage mit 50 Kilogramm Stickstoff je Hektar bestätigt. Daher fallen die Düngerunterschiede sehr gering aus. Den höchsten Biomasseaufwuchs erzielte sowohl in der gedüngten als auch in der ungedüngten Wiederholung die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich. Das lässt den Schluss zu, dass auf diesem Standort diese Mischung hinsichtlich des Biomasseaufwuchses von Vorteil ist. Diese Kombination der verschiedenen Kulturen konnte unter den gegebenen Boden- und Witterungsbedingungen die besten Ergebnisse erzielen. Das Massenwachstum dürfte hierbei eher durch den Ölrettich und auch durch den Mungo gegeben sein, da die Kresse in der Mischung nicht dominant war und von

der Pflanzen- und Massenentwicklung mit den anderen beiden Gemeinpartnern nicht mithalten konnte. Dennoch ist die Kresse hier ein wertvoller Mischungspartner, da sie den verbleibenden Wachstumsraum sehr gut ausnutzen kann.

5.1.4. Lichtenwörth (Trockengebiet)

Die Trockenmasseerträge (Abbildung 13) sind für das Trockengebiet sehr hoch. Dies kann wahrscheinlich auf die hohen Regenmengen im Juli 2012 zurückgeführt werden. Der August und der September waren auch ein wenig feuchter als im 30-jährigen Mittel. Ende Oktober 2012 ist ein sehr früher Wintereinbruch aufgetreten, der das Wachstum beendete und für ein teilweises Absterben einzelner Kulturarten (Mungo) sorgte. Bis zum Wintereinbruch konnten leicht überdurchschnittliche Temperaturen verzeichnet werden, die gemeinsam mit den etwas erhöhten Niederschlägen die Gründüngung besonders gut wachsen ließen. Die frühere Aussaat des Zwischenfruchtbestandes in Verbindung mit den hohen Niederschlägen im Juli führte zu einem sehr hohen Aufwuchs.

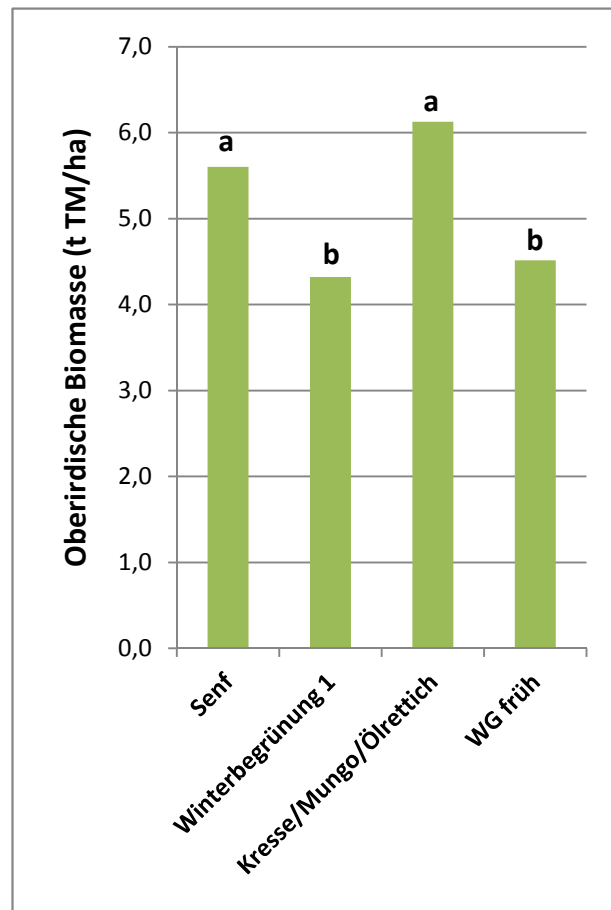


Abbildung 13 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Mit 4,3 t TM/ha hat die Winterbegrünung 1 die geringsten Trockenmasseerträge von allen Varianten aufzuweisen.

Ihr folgt die Wassergüte früh mit 4,5 t TM/ha nach. Diese Mischung konnte sich auch im Trockengebiet gut etablieren, obwohl es eher eine Zwischenfruchtmischung für das

Feuchtgebiet ist. Diese beiden Mischungen weisen nur geringe Abweichungen in den Trockenmassegewichten auf.

Der Senf in Reinsaat (Sareptasenf) hat mit 5,6 t TM/ha die zweithöchsten Trockenmasseerträge auf dem Standort Lichtenwörth. Die auch für Senf hohe Biomasse könnte durch die Verwendung des für Fröhsaaten geeigneten Sareptasenfes anstelle des Gelbsenfes im Trockengebiet erklärt werden. Der Wuchs des Sareptasenfes ist viel kräftiger als jener des Gelbsenfes. Vor allem aber der Stängeldurchmesser ist größer, als der des Gelbsenfes.

Die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich hat mit 6,1 t TM/ha die höchsten Trockenmasseaufwüchse in Lichtenwörth. Der Wert von 6,1 t ist allgemein ein sehr hoher Wert, wenn man ihn mit Literaturangaben vergleicht. Dies kann vor allem auf den kräftigen Wuchs des Ölrettiches zurückgeführt werden.

Die Aussaatmenge bei dieser Variante hat 7,5 kg/ha betragen, wobei der Anteil des Ölrettichs 4 kg/ha betrug. Dieser hohe Ölrettichanteil führt demnach wahrscheinlich zu den höchsten Trockenmassen.

Obwohl die Varianten Senf in Reinsaat und Kresse/Mungo/Ölrettich unterschiedliche Trockenmassegewichte aufweisen, ist statistisch kein signifikanter Unterschied festzustellen.

5.1.5. Wulkaprodersdorf (Trockengebiet)

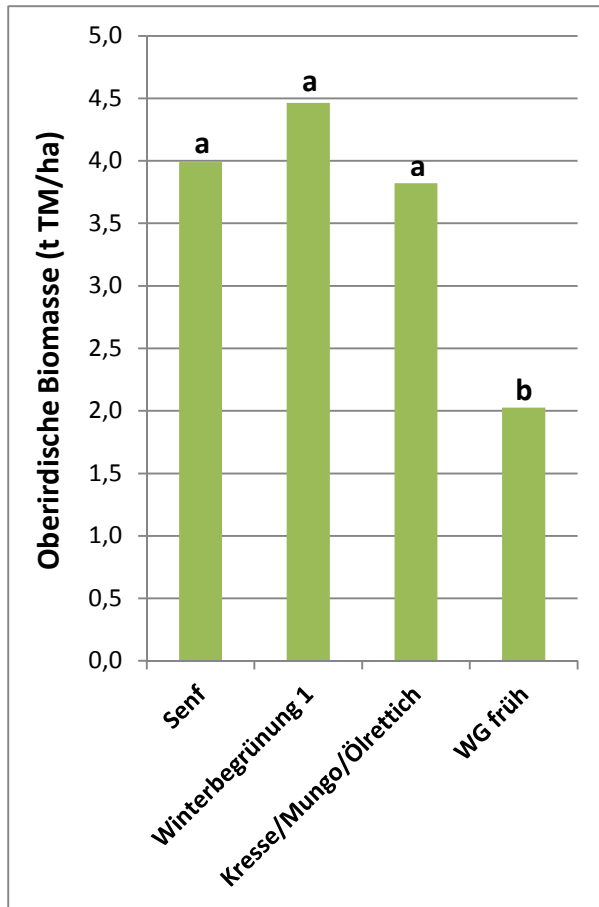


Abbildung 14 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Wulkaprodersdorf. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Auch in Wulkaprodersdorf (Abbildung 14) lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den gedüngten und ungedüngten Varianten feststellen.

Am Standort Wulkaprodersdorf hat die Variante Winterbegrünung 1 mit 4,5 t TM/ha die höchsten Trockenmassegewichte von allen vier Varianten.

Mit 4 t TM/ha hat die Variante Senf in Reinsaat die zweithöchste Trockenmasse. Auch an diesem Standort hat der Senf in Reinsaat im Vergleich zu den anderen Varianten eine relativ hohe Trockenmasse. Der Sareptasenf dürfte, wie schon am Standort Lichtenwörth erwähnt, wegen seinem dicken Stängel und seinem höheren Blattanteil für die höheren Trockenmassegewichte verantwortlich sein.

Die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich hat ein Trockenmassegewicht von 3,8 t/ha. Betrachtet man diese drei Varianten statistisch, so ergeben sich keine Unterschiede in den Trockenmassen.

Die Variante Wassergüte früh hat mit nur 2,0 t TM/ha die geringsten Trockenmassegewichte aller vier Varianten. In dieser Mischung fehlen spätsaatverträgliche Massebildner wie Senf oder Ölrettich. Sie unterscheidet sich statistisch signifikant von den anderen drei Versuchspartzen.

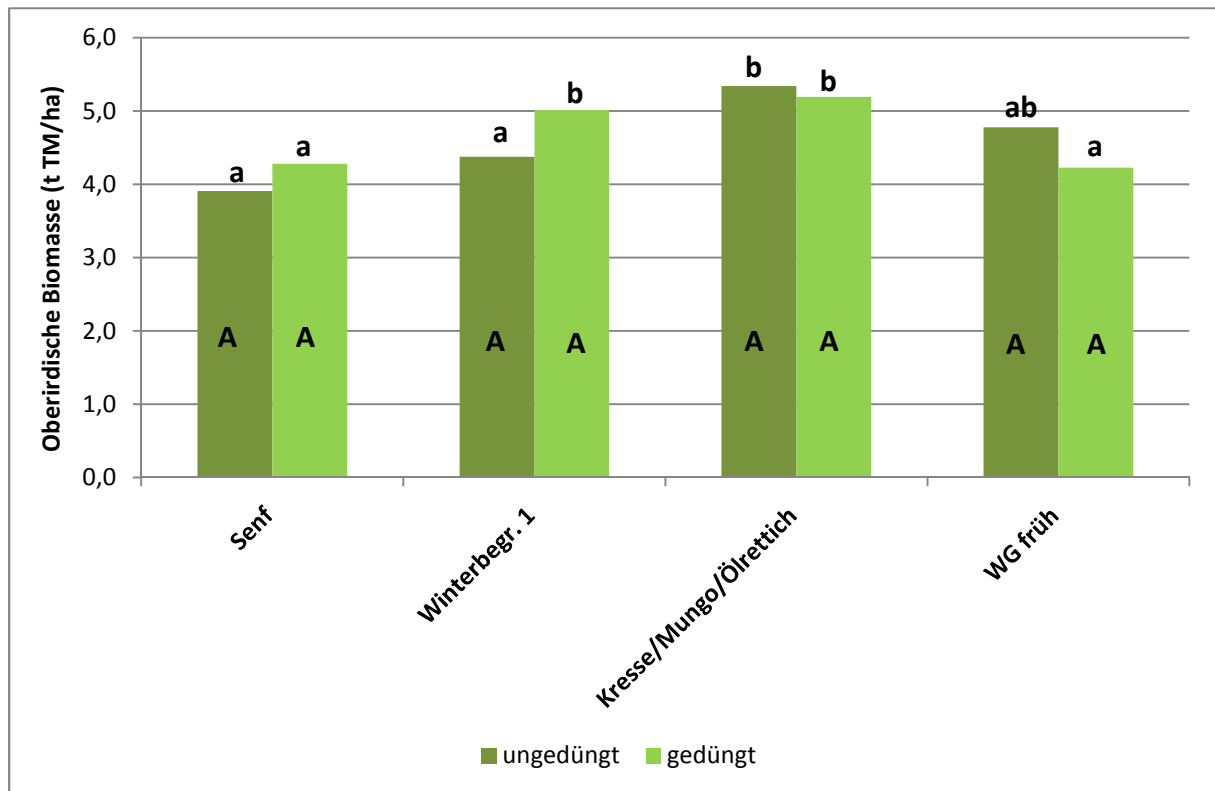


Abbildung 15 Einfluss von Variante*Düngung gemittelt über die Orte auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha. Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb einer Variante mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Die Abbildung 15 zeigt den Biomassegehalt in t TM/ha in der Darstellung Variante*Düngung gemittelt über die Orte. Die Großbuchstaben (Mittelwertsvergleiche) in den einzelnen Säulen verdeutlichen den Unterschied der Biomassegehalte (t TM/ha) innerhalb einer Variante in ungedüngter und gedüngter Form. Die Kleinbuchstaben stellen die Unterschiede zwischen den ungedüngten und gedüngten Varianten dar.

Beim Vergleich der statistischen Unterschiede innerhalb der Varianten konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Eine Düngung der Varianten hat also hier keinen Einfluss auf die Höhe des Trockenmassegehaltes.

Die Varianten in ungedüngter Ausführung differenzieren sich auch nur teilweise voneinander. So sind keine statistischen Unterschiede zwischen der Variante Senf und der Winterbegrünung 1 feststellbar, wobei zwischen der Variante Senf und den Varianten Kresse/Mungo/Ölrettich und der Wassergüte früh Unterschiede bestehen. Zwischen der Winterbegrünung 1 ungedüngt und der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich ungedüngt sind keine Unterschiede zu erkennen.

Betrachtet man bei den gedüngten Varianten die Variante Senf so ergeben sich Unterschiede zwischen der Winterbegrünung 1 und der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich. Die Winterbegrünung 1 unterscheidet sich nicht von der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich, jedoch aber von der Wassergüte früh. Ebenfalls sind signifikante Unterschiede zwischen den Varianten Kresse/Mungo/Ölrettich und der Wassergüte früh feststellbar.

Die höchsten Trockenmassegehalte weist die Variante Kresse/Mungo/Ölrettich ungedüngt mit 5,3 t TM/ha und in der gedüngten Form mit 5,2 t TM/ha auf. Dies kann eventuell auf den Ölrettich, der in dieser Mischung mit 4 kg/ha deutlich dominiert und seiner hohen Trockenmassebildung zurückgeführt werden.

5.2. Stickstoffgehalt und C/N - Verhältnis in der oberirdischen Biomasse

Tabelle 10 Varianzanalyse Stickstoffgehalt

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Ort	4	70,54	< 0,0001
Düngung	1	1,41	0,2382
Ort*Düngung	4	1,03	0,3978
Variante	3	25,54	< 0,0001
Variante*Ort	12	6,05	< 0,0001
Variante*Düngung	3	1,30	0,2798
Variante*Ort*Düngung	12	1,84	0,0558

Betrachtet man die Varianzanalyse (Tabelle 10), lässt sich wieder derselbe Schluss ziehen wie bei der Analyse der Biomasse. Signifikant sind die Varianzursachen Ort und Variante sowie die Wechselwirkung Variante*Ort. Mit einem P-Wert unter 0,05 wird die Nullhypothese verworfen und somit bestehen Unterschiede in diesen Faktoren. Die Darstellung der Varianten erfolgt wiederum nach Orte getrennt sowie gemittelt über die Düngung.

Tabelle 11 Varianzanalyse C/N-Verhältnis

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Ort	4	65,99	< 0,0001
Düngung	1	0,11	0,7414
Ort*Düngung	4	3,54	0,0103
Variante	3	20,46	< 0,0001
Variante*Ort	12	8,03	< 0,0001
Variante*Düngung	3	0,79	0,5549
Variante*Ort*Düngung	12	1,83	0,0677

Die Varianzanalyse hinsichtlich des C/N-Verhältnisses (Tabelle 11) zeigt, dass man wieder die Varianzursachen Ort und Variante sowie die Wechselwirkung Variante*Ort erkennen kann.

Einen weiteren signifikanten Unterschied lässt sich bei der Wechselwirkung Ort*Düngung erkennen. Aus Gründen der Vereinheitlichung und der starken Orts- und Varianteneffekte wird zuerst wieder die Darstellung der Varianten nach Orte getrennt und gemittelt über die Düngung gezeigt.

5.2.1. Ort im Innkreis (Feuchtgebiet)

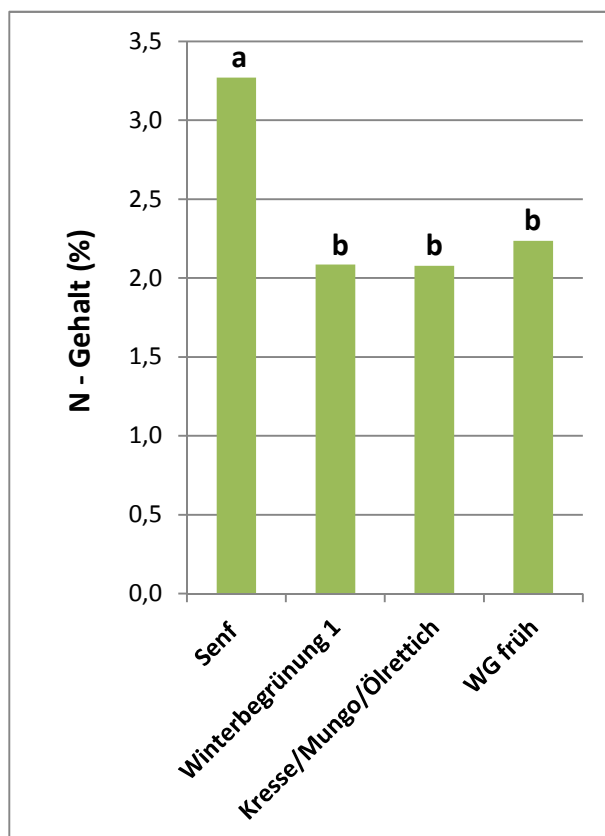


Abbildung 16 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Ort/Innkreis. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Der Stickstoffgehalt in Prozent am Versuchsstandort Ort im Innkreis schwankt in einem Bereich von 2,1 bis 3,3 Prozent (Abbildung 16). Die höchsten Stickstoffgehalte konnten bei den Varianten mit Senf in Reinsaat festgestellt werden. Senf weist hier einen um über ein Prozent höheren Gehalt auf, als die anderen Versuchsvarianten.

Ein Erklärungsansatz ist der spätere Saattermin, wodurch das Pflanzenmaterial entsprechend jünger und weniger verholzt ist. Die anderen Versuchsvarianten liegen hinsichtlich der Stickstoffgehalte mit 2,1 Prozent beziehungsweise 2,2 Prozent sehr nahe beieinander und zeigen keine signifikanten Unterschiede. Dieser höhere

Stickstoffgehalt in der oberirdischen Pflanzenmasse lässt sich unter Umständen auch durch besondere Pflanzeninhaltsstoffe, die sogenannten Glucosinolate erklären. Diese Glucosinolate enthalten neben vielen anderen Komponenten als Hauptbestandteil Stickstoff.

Das C/N-Verhältnis gibt das Massenverhältnis von Kohlenstoff und Stickstoff im Pflanzenmaterial an. Je enger das Verhältnis ist, desto schneller wird die organische Substanz abgebaut und steht in weiterer Folge als Stickstoffquelle zur Verfügung. Mit zunehmendem Abbau sinkt das C/N-Verhältnis auf Werte um 10:1 ab. Dieses Verhältnis entspricht jenem in landwirtschaftlich genutzten Böden.

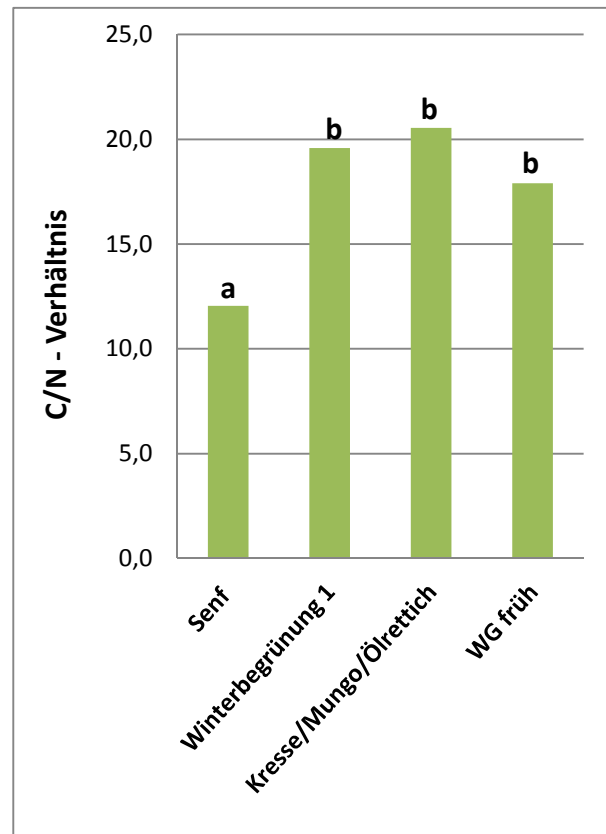


Abbildung 17 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Ort/Innkreis.

Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Betrachtet man die Ergebnisse in Ort im Innkreis in der Abbildung 17, so lässt sich erkennen, dass Senf in Reinsaat mit 12:1 das geringste C/N-Verhältnis aufweist. Die Variante Senf unterscheidet sich daher

signifikant von den anderen drei Varianten. Dieses Ergebnis lässt sich auf den späteren Saattermin und somit einem geringeren Alter der oberirdischen Pflanzenmasse zurückführen. Dadurch kam es zu einer geringeren Verholzung der oberirdischen Biomasse und dies bedingt eine schnellere Abbaubarkeit und ein niedrigeres C/N-Verhältnis. Die höchsten C/N-Verhältnisse mit 18 bis 20:1 weisen die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich, Winterbegrünung 1 und Wassergüte früh auf. Zwischen diesen drei Mischungen bestehen keine Unterschiede.

5.2.2. Pötting (Feuchtgebiet)

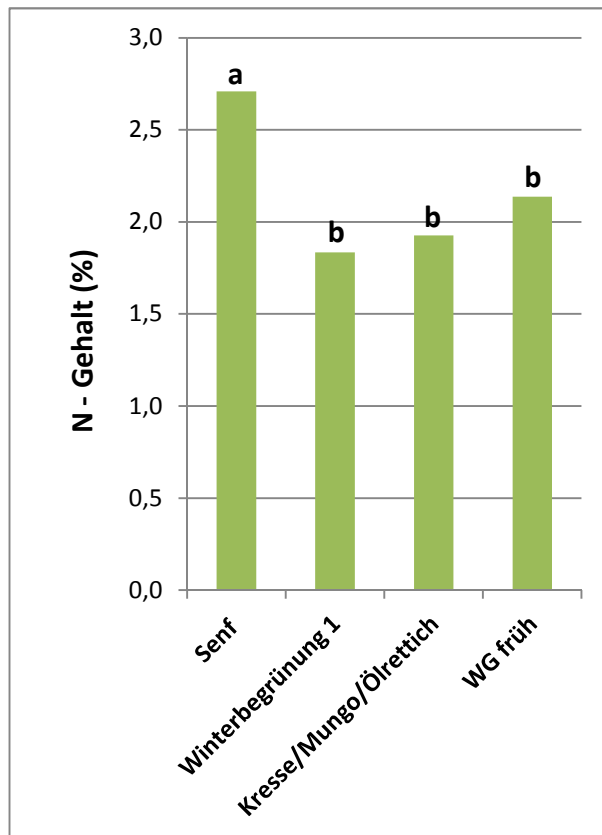


Abbildung 18 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Pötting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Am Standort Pötting (Abbildung 18) zeigen die Ergebnisse hinsichtlich des prozentuellen Stickstoffgehaltes eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen am Versuchsstandort in Ort im Innkreis. Senf weist hier mit 2,7 Prozent die höchsten prozentuellen Stickstoffwerte auf. Der Unterschied zum Schnitt der anderen Varianten liegt bei knapp unter einem Prozent.

Der Unterschied der Varianten zueinander mit Ausnahme von Senf liegt im Mittel bei nur 0,2 Prozent und ist somit nicht signifikant.

Entsprechend ist bei Senf in Reinsaat im Mittel das geringste C/N-Verhältnis von 16:1 festzustellen (Abbildung 19).

Höhere C/N-Verhältnisse von 22:1 zeigen die Begrünungsmischungen mit Kreuzblütlern bei dem früheren Saattermin. Die Mischung Wassergüte früh hat in diesem Versuch ein C/N-Verhältnis von 18:1. Ein enges C/N-Verhältnis wie hier bei Senf oder der Mischung Wassergüte früh bedingt einen rascheren Abbau der organischen Substanz und eine frühere Bereitstellung von Nährstoffen für die Folgekultur. Bei Senf wirkt sich auch wieder der spätere Saattermin und somit die geringere Verholzung auf das Ergebnis aus.

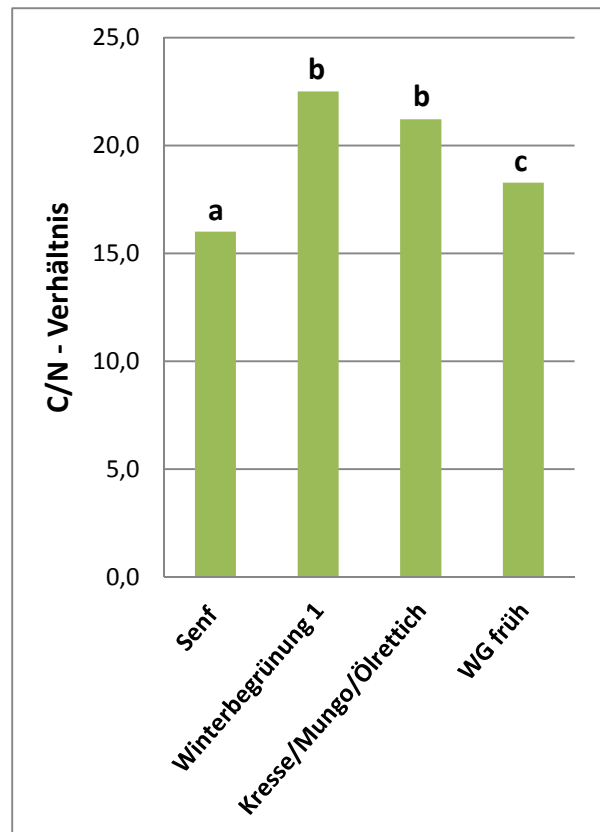


Abbildung 19 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Pötting.

Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

5.2.3. Bad Wimsbach-Neydharting (Feuchtgebiet)

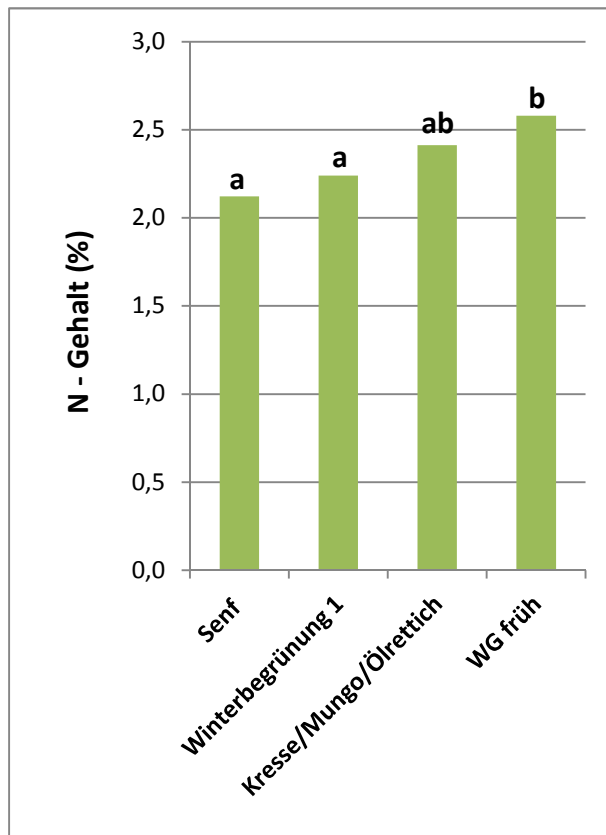


Abbildung 20 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Bad Wimsbach – Neydharting.
Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Am Versuchsstandort Bad Wimsbach-Neydharting (Abbildung 20) liegen die prozentuellen Stickstoffgehalte sehr nahe beisammen. Den höchsten prozentuellen Stickstoffgehalt erreichte im Mittel die Variante Wassergüte früh mit 2,6 Prozent, gefolgt von den anderen Varianten mit einem durchschnittlichen Gehalt von 2,3 Prozent. Signifikante Unterschiede bestehen zwischen den Varianten Senf in Reinsaat und der Mischung Wassergüte früh. Die anderen beiden Mischungen unterscheiden sich von den vorher genannten nicht. Die

Stickstoffkonzentration bei der Variante Senf unterschied sich hier von den beiden anderen Versuchsstandorten (Ort/I. und Pötting).

In der Abbildung 21 zeigt sich bei den C/N-Ergebnissen im Vergleich zu den anderen Versuchsstandorten ein anderes Bild. So weist die Variante Senf in Reinsaat hier das höchste C/N-Verhältnis von 20:1 auf, gefolgt von der Mischung Winterbegrünung 1 mit 18:1. Diese beiden Mischungen unterscheiden sich statistisch gesehen nicht.

Ein signifikanter Unterschied kann zur Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich mit einem C/N-Verhältnis von 17:1 und zur Mischung Wassergüte früh mit einem C/N-Verhältnis von 13,7:1 festgestellt werden. Letztere unterscheidet sich somit von allen anderen Versuchsvarianten. Diese Mischung wird am raschesten abgebaut und für die Nährstofflieferung herangezogen.

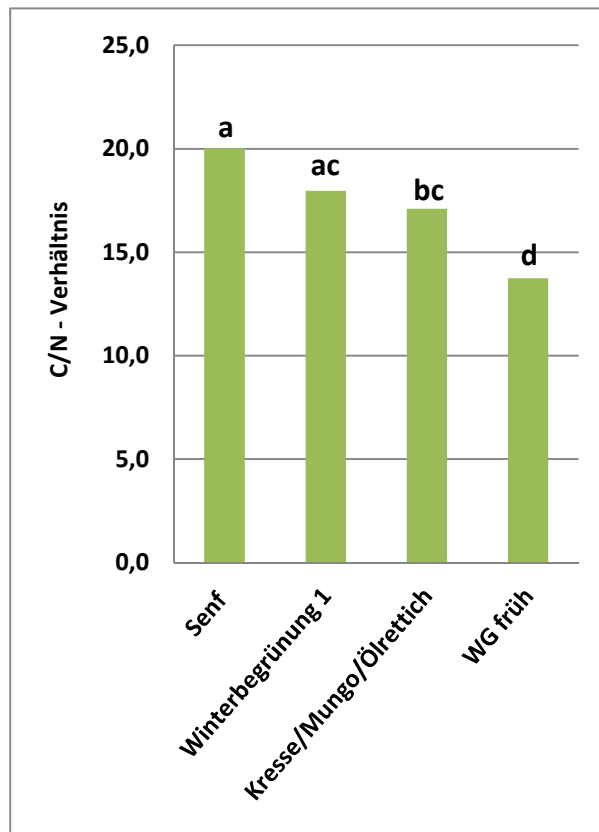


Abbildung 21 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Bad Wimsbach-Neydharting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

5.2.4. Lichtenwörth (Trockengebiet)

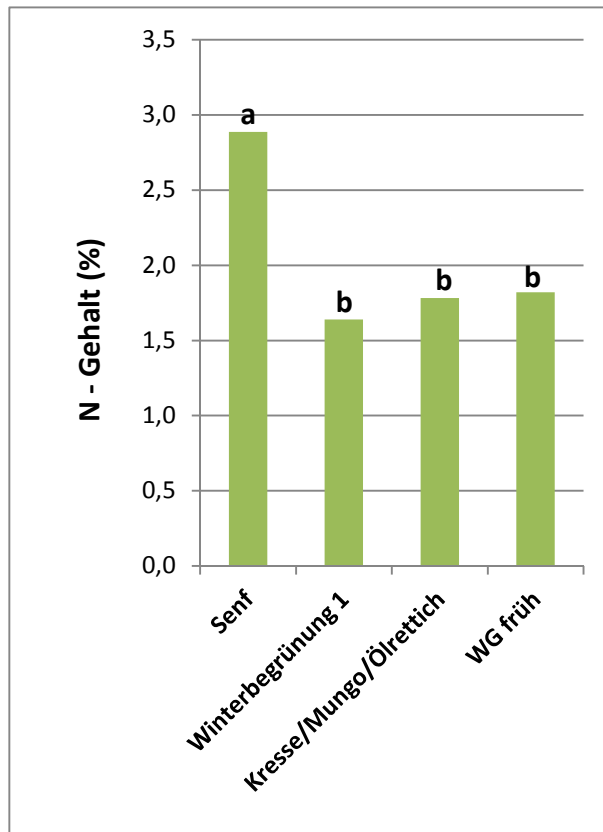


Abbildung 22 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Beim Vergleich des N-Gehaltes in der oberirdischen Biomasse der einzelnen Varianten war kein signifikanter Unterschied zwischen den gedüngten und ungedüngten Varianten erkennbar.

Der prozentuelle Stickstoffgehalt der oberirdischen Biomasse am Standort Lichtenwörth (Abbildung 22) zeigt die im Vergleich zu den anderen Varianten stark erhöhten N-Gehalte bei der Variante Senf in Reinsaat mit 2,9 %. Ein Grund für den höheren N-Gehalt kann der Sareptasenf sein, bei dem man ein langes vegetatives Wachstum (lange Jugendphase) beobachten konnte und kein Anzeichen einer Blüte festzustellen war. Der höhere Stickstoffgehalt kann möglicherweise auch

auf die bei Kreuzblütlern vorhandenen Glucosinolate (=Senföle), die auf stickstoffhaltigen Verbindungen aufgebaut sind, zurückgeführt werden. So liegen die Stickstoffgehalte um 1,3 Prozent höher als bei der Winterbegrünung 1.

Die Wassergüte früh hat mit 1,8 % den zweithöchsten prozentuellen Stickstoffgehalt. Dies lässt sich wahrscheinlich durch den Leguminosenanteil in dieser Fertigmischung erklären.

Knapp darunter liegt die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich mit einem N-Gehalt von 1,8 %. Obwohl diese Mischung aus zwei Kreuzblütlern (Kresse, Ölrettich) besteht, ist der Stickstoffgehalt deutlich unter jenem des Senfes.

Mit 1,6 % hat die Winterbegrünung 1 den geringsten prozentuellen Stickstoffgehalt aller Varianten. Die prozentuellen N-Gehalte der drei Varianten unterscheiden sich nur marginal.

Ein prozentuell stark erhöhter N-Gehalt kann demnach nur bei Senf in Reinsaat wahrgenommen werden. Alle anderen Varianten liegen deutlich darunter und weisen einen ähnlichen N-Gehalt zwischen 1,6 und 1,8 % auf. Es gibt daher zwischen dem Senf in Reinsaat und den übrigen drei Varianten einen statistisch signifikanten Unterschied zu beobachten.

Die Variante Senf in Reinsaat (Abbildung 23) weist auf diesem Standort das engste C/N-Verhältnis mit 14:1 auf. Dieses sehr enge C/N-Verhältnis des Senfes kann auf den erhöhten Stickstoffgehalt in der oberirdischen Biomasse zurückgeführt werden. Der hohe Stickstoffgehalt dürfte durch die lange Jugendphase des Sareptasenfes und des damit einhergehenden hohen N-Gehaltes erklärt werden können. Demnach ist eine raschere Rotte des Senfmulches im Gegensatz zu den anderen Varianten zu erwarten.

Das weiteste C/N-Verhältnis liegt mit 27:1 bei der Winterbegrünung 1 vor. Dies kann wahrscheinlich auf den Gelbsenf, der im Vergleich zum Sareptasenf eine deutlich

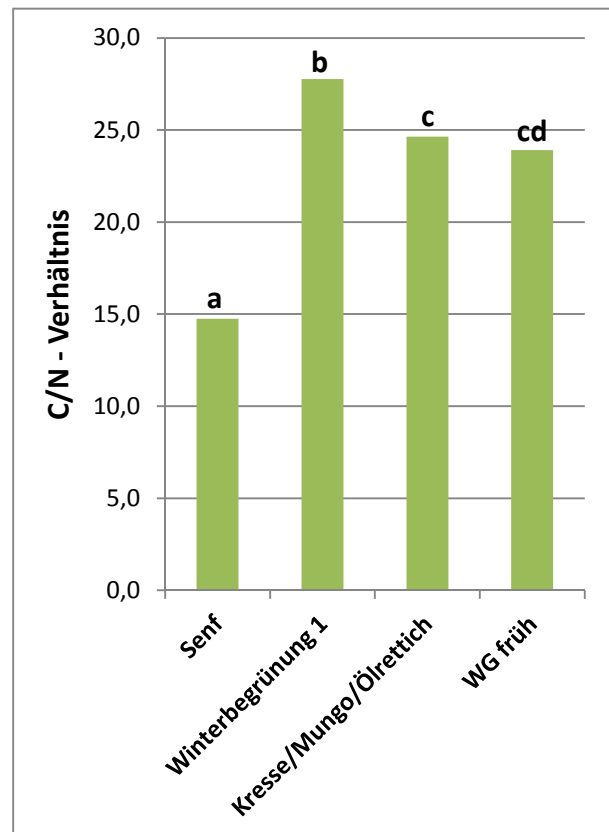


Abbildung 23 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

kürzere vegetative Phase aufweist, zurückgeführt werden. Außerdem ist er früher gesät worden als an den Standorten im Feuchtgebiet, wodurch sich in der Folge ein niedrigerer N-Gehalt ergibt.

Ihr folgt die Variante Kresse/Mungo/Ölrettich mit 24:1 nach. Die Wassergüte früh weist von allen Varianten das zweitengste C/N-Verhältnis mit 23:1 auf. Der Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Varianten ist mit einer Differenz von 0,7 als sehr gering und statistisch als vernachlässigbar einzustufen.

5.2.5. Wulkaprodersdorf (Trockengebiet)

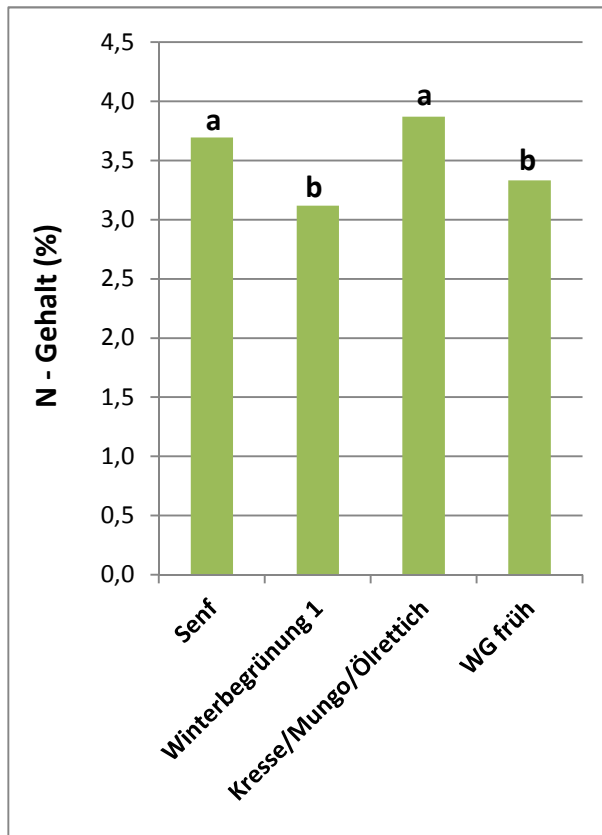


Abbildung 24 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Wulkaprodersdorf. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Der Stickstoffgehalt in Prozent am Standort Wulkaprodersdorf (Abbildung 24) ist bei der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich mit 3,9 % am höchsten.

Ihr folgt die Variante Senf in Reinsaat mit einem Stickstoffgehalt von 3,7 % nach.

Die Wassergüte früh hat mit einem N-Gehalt von 3,3 % in der oberirdischen Biomasse den dritthöchsten N-Gehalt aller Varianten. Den geringsten prozentuellen Stickstoffgehalt hat die Winterbegrünung 1 mit 3,1 %.

Statistisch betrachtet unterscheiden sich die Variante Senf in Reinsaat und die Variante Kresse/Mungo/Ölrettich voneinander nicht. Ebenso ist statistisch betrachtet kein signifikanter Unterschied

zwischen der Variante Winterbegrünung 1 und der Wassergüte früh feststellbar. Es sind deshalb nur die erste und die dritte Variante von der zweiten und der vierten Variante statistisch signifikant unterschiedlich.

Die Variante Kresse/Mungo/Ölrettich hat einen höheren prozentuellen N-Gehalt, als der Senf in Reinsaat. In der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich kommen allerdings zwei Kreuzblütler vor, nämlich die Kresse und der Ölrettich, wobei der Ölrettich ein sehr hohes Stickstoffaufnahmevermögen aufweist. Außerdem hat der Ölrettich mit 4 von 7,5 kg/ha Aussaatmenge einen hohen Anteil in dieser Mischung. Zusammen mit der Kresse ergeben sich 6 kg/ha Aussaatmenge.

Auf diesem Standort erfolgte die Aussaat der Zwischenfrüchte jedoch um fast drei Wochen später. Der höhere N-Gehalt in der Biomasse kann daher auch auf den noch jüngeren Pflanzenbestand zurückgeführt werden, was auch durch den im Mittel höheren N-Gehalt auf diesem Standort nachvollzogen werden kann.

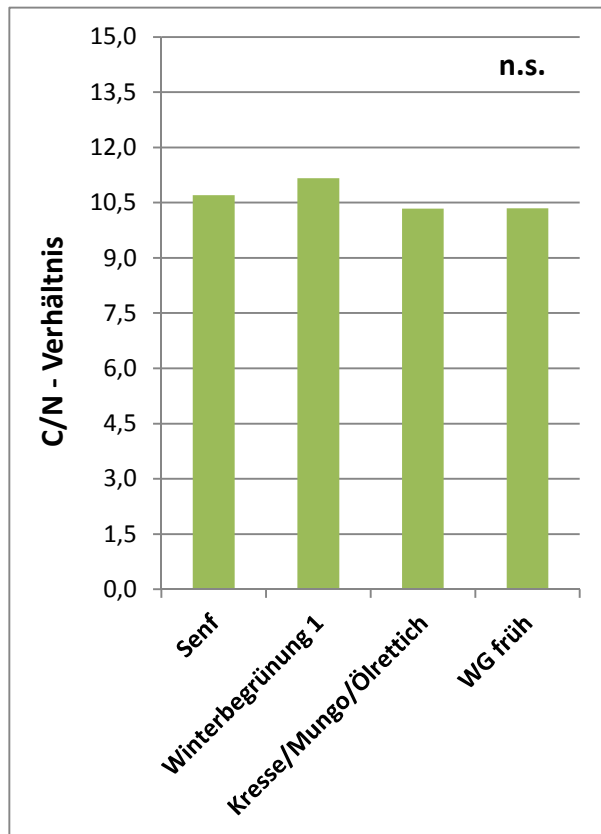


Abbildung 25 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Wulkaprodersdorf

Die Winterbegrünung 1 (Abbildung 25) hat mit einem C/N-Verhältnis von 11:1 das weiteste von allen. Demnach dauert die Verrottung des organischen Materials bei dieser Mischung am längsten. Dieses weitere C/N-Verhältnis bei der Winterbegrünung 1 kann auf den Gelbsenf zurückgeführt werden, welcher eine kürzere vegetative Phase aufweist als der Sareptasenf und wo der Stickstoffgehalt in der Biomasse sinkt.

Das zweitweiteste C/N-Verhältnis hat der Senf in Reinsaat mit 11:1.

Die anderen beiden Varianten Kresse/Mungo/Ölrettich und Wassergüte

früh haben mit jeweils 10:1 das gleiche C/N-Verhältnis. Aufgrund dieses engen C/N-Verhältnisses erfolgt die Zersetzung des pflanzlichen Materials bei diesen beiden Varianten am raschesten.

Statistisch betrachtet ergeben sich zwischen den einzelnen Varianten allerdings keine Unterschiede.

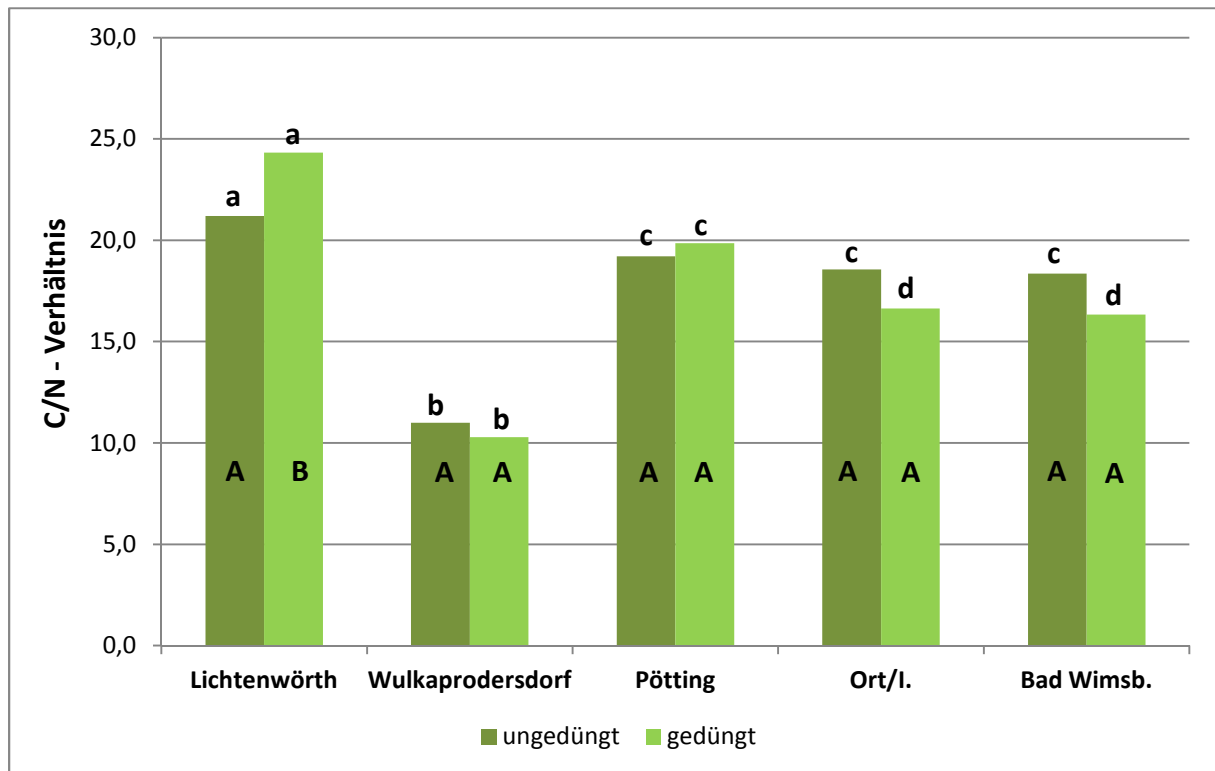


Abbildung 26 Einfluss von Ort*Düngung auf das C/N-Verhältnis der oberirdischen Biomasse. Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb eines Standortes mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Standorten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Die Abbildung 26 zeigt das C/N-Verhältnis in der Darstellung Ort*Düngung gemittelt über die Varianten. Die Großbuchstaben in den einzelnen Säulen verdeutlichen den Unterschied in den C/N-Verhältnissen innerhalb eines Standortes mit ungedüngter und gedüngter Fläche. Die Kleinbuchstaben stellen die Unterschiede zwischen den ungedüngten und gedüngten Parzellen an den verschiedenen Standorten dar.

Innerhalb der Standorte sind nur am Standort Lichtenwörth statistische Unterschiede zwischen den ungedüngten und gedüngten Flächen feststellbar. An den übrigen vier Standorten können keine Unterschiede betrachtet werden.

Vergleicht man die ungedüngten Parzellen an den verschiedenen Standorten miteinander so sind statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Standorten Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf, und den restlichen drei Standorten feststellbar. Die drei Standorte Pötting, Ort/I. und Bad Wimsbach-Neydharting unterscheiden sich nicht voneinander.

Beim Vergleich der gedüngten Flächen sind keine Unterschiede zwischen den Standorten Ort/I. und Bad Wimsbach-Neydharting erkennbar. Deutliche Unterschiede lassen sich aber

zwischen dem Standort Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf, Pötting und den beiden anderen Standorten (Ort/I. und Bad Wimsbach-Neydharting) beobachten.

5.3. $N_{\min}$ - Gehalt des Bodens

Tabelle 12 Varianzanalyse $N_{\min}$

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Ort	4	38,20	< 0,0001
Düngung	1	40,63	< 0,0001
Ort*Düngung	4	7,49	0,5501
Variante	4	10,95	< 0,0001
Variante*Ort	16	2,42	0,0041
Variante*Düngung	4	3,31	0,0138
Variante*Ort*Düngung	16	1,94	0,0245
Tiefe	1	115,76	< 0,0001
Ort*Tiefe	4	1,92	0,1130
Düngung*Tiefe	1	0,04	0,8456
Ort*Düngung*Tiefe	4	2,71	0,0345
Variante*Tiefe	4	2,24	0,0704
Ort*Variante*Tiefe	16	2,09	0,0142
Variante*Düngung*Tiefe	4	1,78	0,1383
Ort*Variante*Düngung*Tiefe	16	1,38	0,1677
Termin	1	8,87	0,0036
Ort*Termin	4	13,63	0,5601
Düngung*Termin	1	2,27	0,1351
Ort* Düngung*Termin	4	2,96	0,0234
Variante*Termin	4	2,79	0,0301
Ort*Variante*Termin	16	1,15	0,3178
Variante*Düngung*Termin	4	4,01	0,0047
Ort*Variante*Düngung*Termin	16	0,80	0,6813

Die Varianzanalyse für $N_{\min}$ (Tabelle 12) zeigt eine Vielzahl von Varianzursachen und Wechselwirkungen. Um eine einheitliche Darstellung und somit eine entsprechende Übersichtlichkeit zu gewährleisten wurden die Ergebnisse zuerst getrennt nach Orten, Varianten und Düngung, aber gemittelt über den Termin dargestellt. Im Anschluss werden dann in einem Standortsvergleich die Zweifach-Wechselwirkungen Variante*Ort, Variante*Düngung und Variante*Termin dargestellt. Wie in der Varianztabelle zu erkennen ist, traten signifikante Dreifach-Wechselwirkungen auf. Da hier jedoch die statistischen Mittelwertsvergleiche aufgrund der höheren Zahl an Standorten schwer grafisch darzustellen sind sowie die Interpretation der Dreifachwechselwirkung schwierig ist, werden

zuerst die Ergebnisse als Wechselwirkung Düngung*Variante nach Ort getrennt zur Dokumentation ohne Angabe der Signifikanz dargestellt und dann als zusammenfassende Übersicht die Zweifachwechselwirkungen.

5.3.1. $N_{\min}$ -Ergebnisse der Standorte

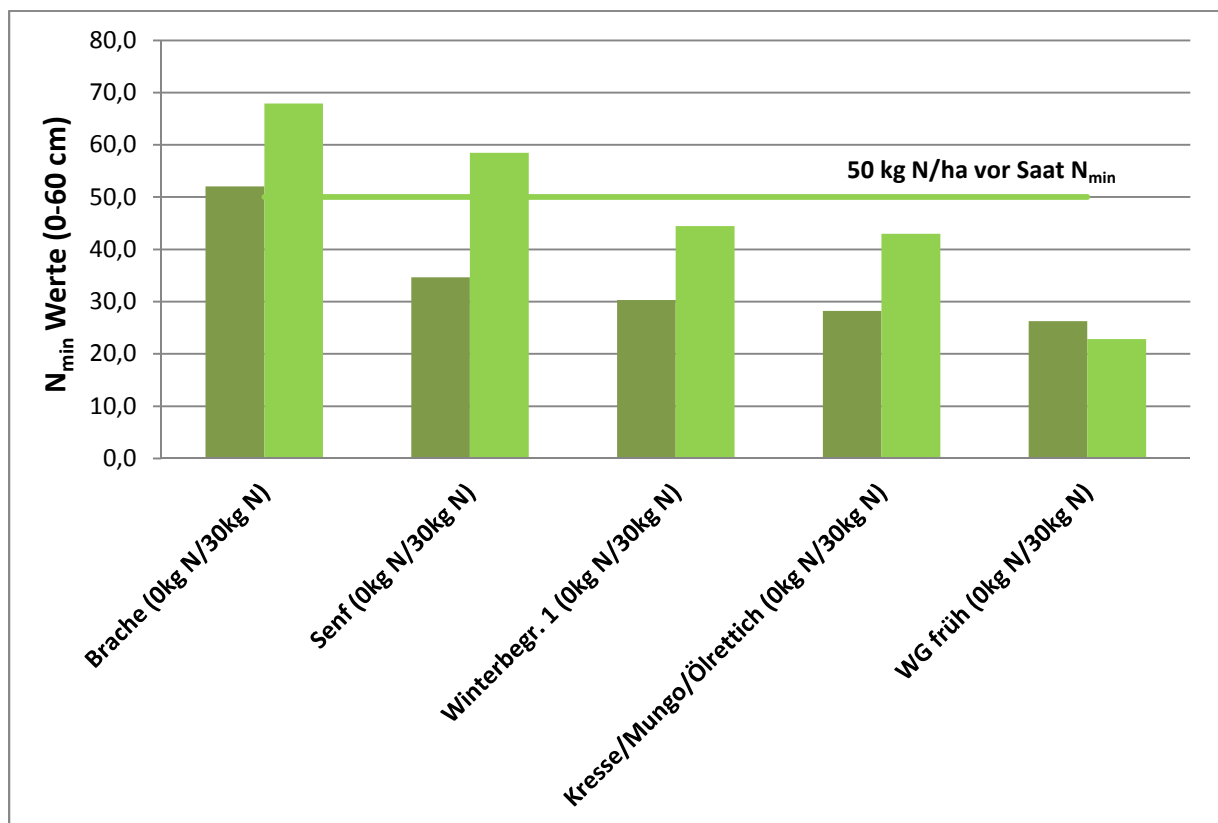


Abbildung 27 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Ort/Innkreis (kg N/ha).

Die $N_{\min}$ -Werte am Standort Ort im Innkreis zeigen in der Abbildung 27 auf den ersten Blick die Sinnhaftigkeit einer Begrünung. Der Gehalt an mineralisiertem Stickstoff liegt bei der gedüngten Schwarzbrache mit 68 Kilogramm über jenem der begrünten Flächen und über dem Vorsaat $N_{\min}$ von 50 Kilogramm je Hektar. Die Schwarzbracheflächen unterscheiden sich von allen anderen Versuchsvarianten. Somit zeigt sich, dass durch die Anlage einer Winterbegrünung effektiv Nährstoffe gebunden werden und so vor Auswaschung über den Winter geschützt sind. Auch zeigt sich ein Unterschied in den $N_{\min}$ -Werten zwischen der gedüngten und der ungedüngten Wiederholung. Diese Unterschiede lassen sich bei allen Versuchsvarianten, ausgenommen der Mischung Wassergüte früh

feststellen. Daraus lässt sich folgern, dass eine Düngung der Flächen hinsichtlich der $N_{\min}$ -Werte einen Einfluss hat, dieser aber gerade bei Schwarzbrachen über den Winter zu Problemen führen kann. Begrünungen können den anfallenden Stickstoff aus Wirtschaftsdüngern effektiv nutzen und in die Pflanzenmasse einbauen. Die $N_{\min}$ -Werte der gedüngten Wiederholung sind bei den verschiedenen Varianten im Vergleich zur ungedüngten Wiederholung erhöht, dürften aber hinsichtlich des Nährstoffverlustes keinerlei Probleme darstellen.

Ebenfalls sehr gut zu erkennen ist in der gedüngten Wiederholung der Effekt eines späteren Saattermines. Hier erhöht sich im Vergleich zu den anderen Mischungen der $N_{\min}$ -Wert bereits deutlich, mit nur noch einem geringen Abstand zur Kontrollvariante Schwarzbrache mit den höchsten $N_{\min}$ -Werten in der gedüngten Wiederholung. In der ungedüngten Wiederholung ist dieser Unterschied aufgrund der fehlenden Düngung nicht mehr zu erkennen. Hier liegen ohnehin die $N_{\min}$ -Werte mit Ausnahme der Schwarzbrache sehr nahe beieinander und schwanken nur um etwa 10 Kilogramm mineralisiertem Stickstoff je Hektar. Die geringsten $N_{\min}$ -Werte zeigte in der ungedüngten und gedüngten Wiederholung die Mischung Wassergüte früh. Aufgrund des hohen Mischungsanteiles an Alexandrinerklee könnte man vermuten, dass hier die $N_{\min}$ -Werte im Vergleich deutlich erhöht sein müssten. Eine Erklärung könnte die gute Speicherleistung von Phacelia und Mungo oder die geringe Sammelleistung des Klees sein.

Die $N_{\min}$ -Werte am Standort Ort im Innkreis schwanken in einem Bereich von 22,8 bis 67,9 Kilogramm mineralisiertem Stickstoff je Hektar. Die höchsten Werte wurden bei der Kontrollvariante Schwarzbrache ermittelt. Eine effektive Begrünung, welche zeitgerecht angelegt wurde, kann entsprechend viel Stickstoff speichern und so den $N_{\min}$ -Wert des Bodens im Herbst deutlich verringern. Ein niedriger $N_{\min}$ -Wert bedeutet wenig Auswaschungsgefahr und somit einen geringen Verlust an wertvollen und teuren Nährstoffen.

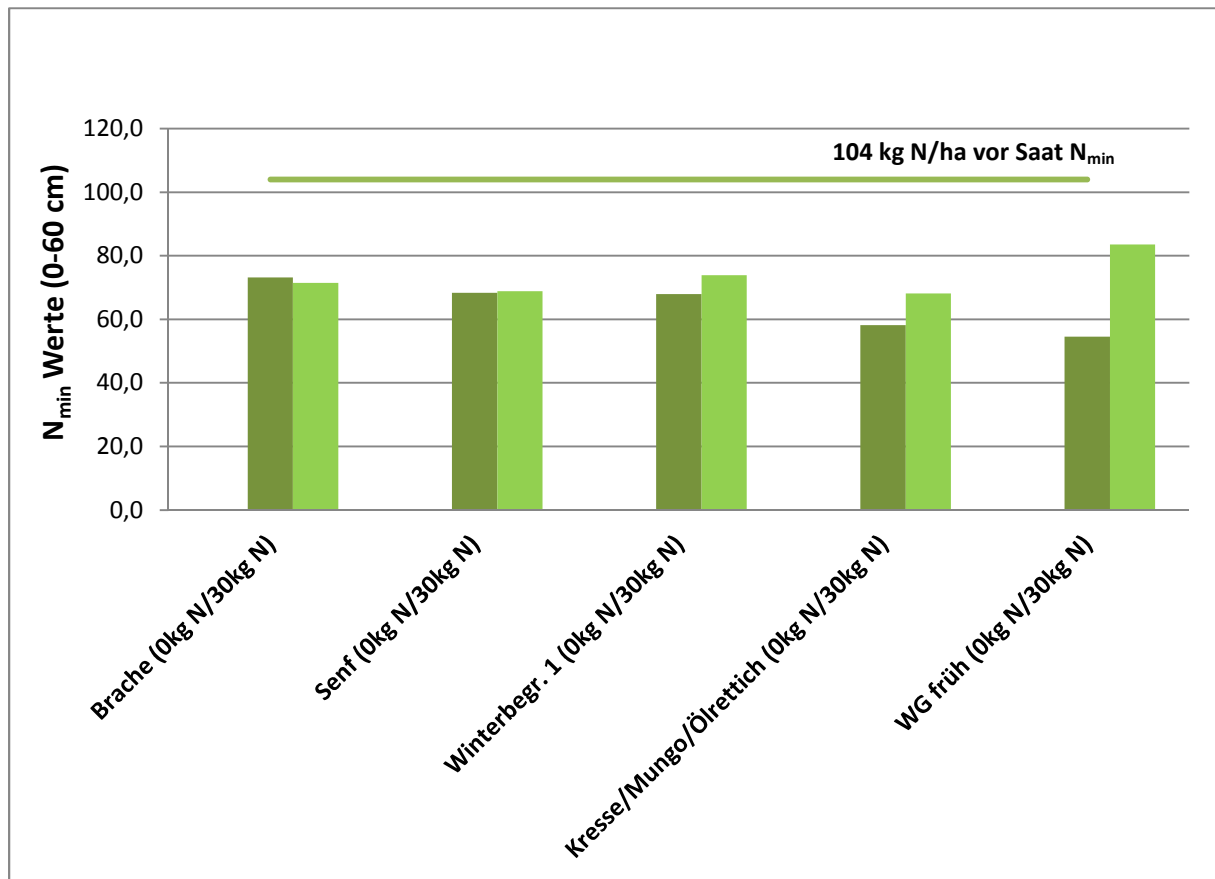


Abbildung 28 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den N_{min}-Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Pötting (kg N/ha).

Die Ergebnisse der N_{min}-Analysen am Standort Pötting (Abbildung 28), gemittelt über den Termin, zeigen eine sehr große Ähnlichkeit. Deutlich zu erkennen ist der generelle Effekt der Begrünung. Der Vorsaat N_{min}-Gehalt von 104 Kilogramm reduzierte sich im Schnitt der Varianten auf einen N_{min}-Gehalt von etwa 70 Kilogramm je Hektar. Da die Versuchsflächen der Schwarzbrache durch Ausfallgetreide begrünt und mit einer mechanischen Bodenbearbeitung bereinigt wurden, kann auch hier von einer Nährstoffaufnahme und keinem Verlust ausgegangen werden.

Dieses Ergebnis lässt sich unter Umständen durch die gute Versorgung des Bodens mit Nährstoffen erklären. Durch eine regelmäßige Wirtschaftsdüngeranwendung kam es hier nur zu sehr geringen Unterschieden in den N_{min}-Werten. Ein weiterer Faktor, der bei diesem Ergebnis sicherlich noch zu beachten ist, war die ertragsmäßig geringe Wintergerstenernte mit einem hohen Düngerniveau. Durch die Witterung im Winter und Frühjahr 2012 kam es bei der Wintergerste zur Auswinterung. Um einen Verlust zu kompensieren, wurde die Düngermenge in der Folge erhöht, was aber durch die schlechten Wachstumsbedingungen

im Frühjahr 2012 nicht mehr in Ertrag umgesetzt werden konnte. Dadurch lassen sich auch die hohen Vorsaat $N_{\min}$ -Werte von 104 Kilogramm je Hektar erklären. Diese beiden Erklärungsansätze lassen die nicht vorhandenen Unterschiede in Pötting einigermaßen gut belegen.

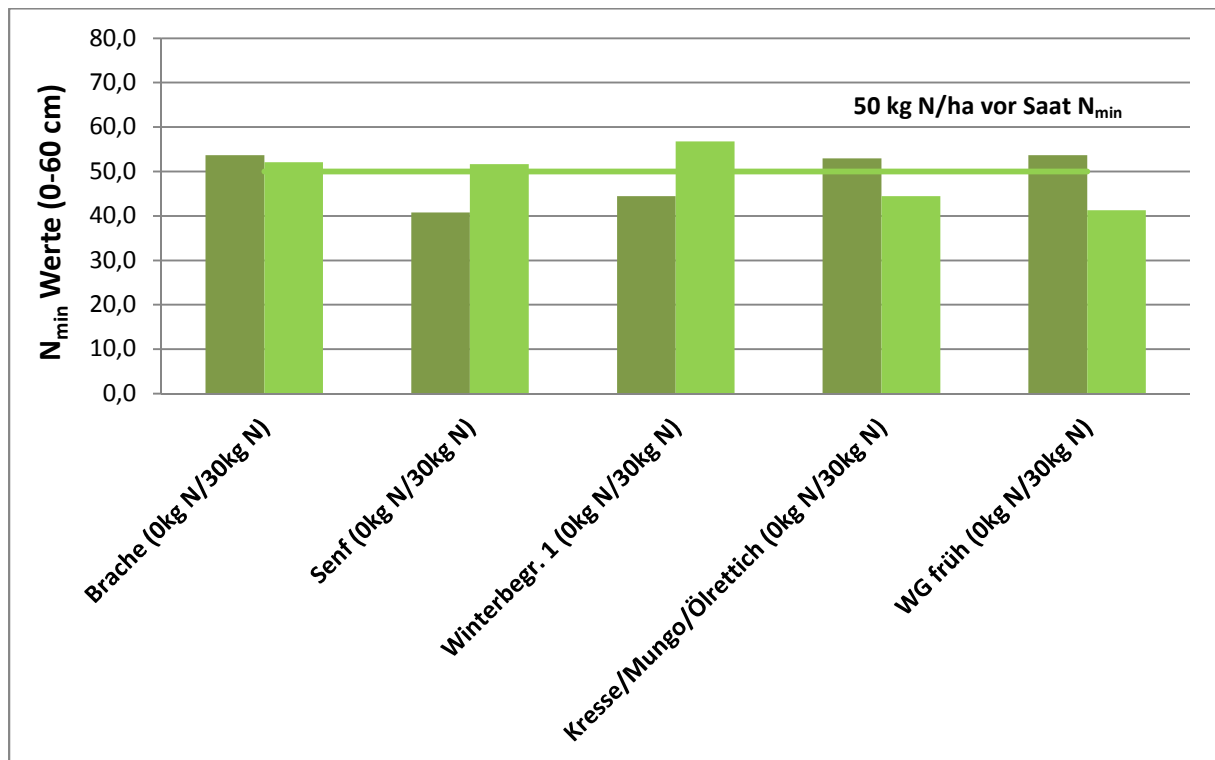


Abbildung 29 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Bad Wimsbach - Neydharting (kg N/ha).

In Bad Wimsbach – Neydharting (Abbildung 29) zeigen sich einheitliche Ergebnisse. Der Effekt der Varianten ist hier nicht zu erkennen. Dieser Standort ist ebenfalls mit Nährstoffen aus Wirtschaftsdünger sehr gut versorgt. Dieser Aspekt erklärt die nicht vorhandenen Unterschiede in den $N_{\min}$ -Werten. Diese schwanken in einem sehr engen Bereich von 41,3 bis 56,8 Kilogramm mineralisiertem Stickstoff je Hektar und liegen im Bereich des Vorsaat $N_{\min}$ -Gehaltes mit 50 Kilogramm je Hektar.

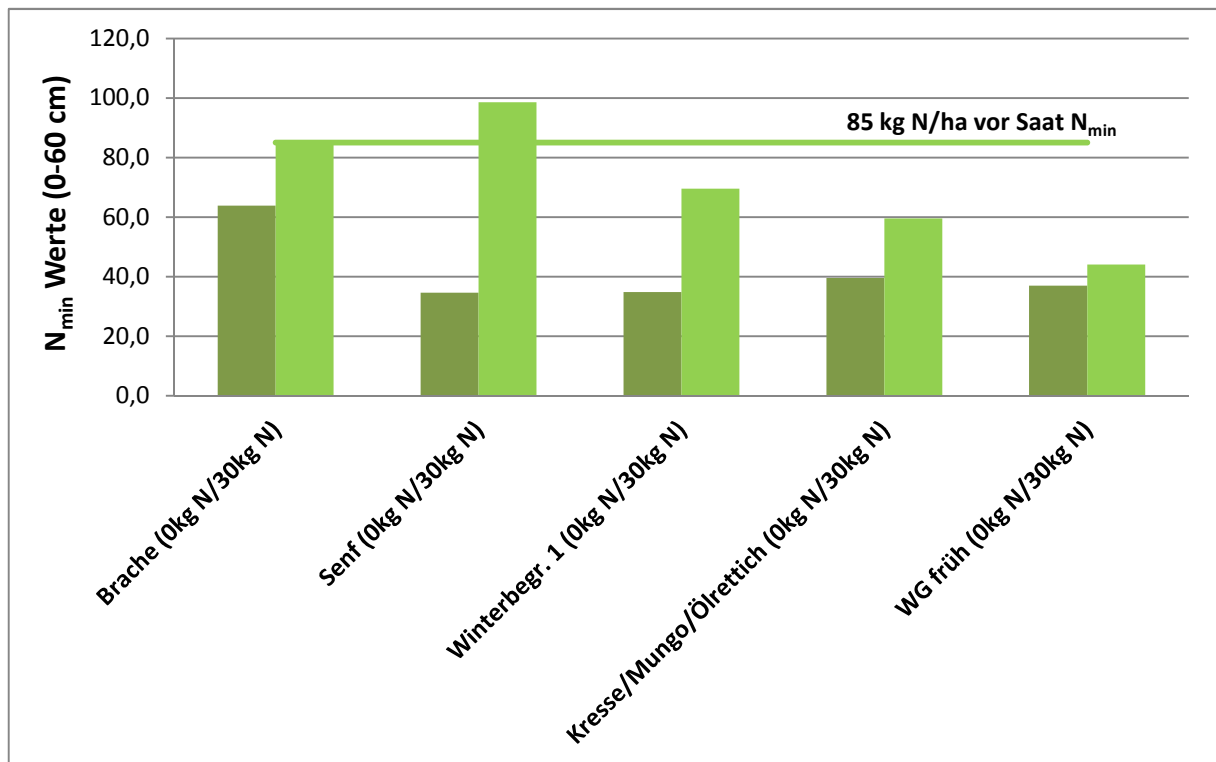


Abbildung 30 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den N_{min} -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Lichtenwörth (kg N/ha).

Aus dem Diagramm, das den Standort Lichtenwörth darstellt (Abbildung 30) kann eindeutig der Effekt der Düngung nachvollzogen werden. Bei allen Varianten, auch bei der Kontrollvariante Brache kann ein höherer N_{min} -Wert bei den gedüngten Parzellen beobachtet werden.

Erwartungsgemäß zeigt die Brache hohe N_{min} -Werte auf, da kein mineralisierter Stickstoff aus dem Boden aufgrund des fehlenden Pflanzenbestandes aufgenommen werden konnte. So beläuft sich der N_{min} -Gehalt bei der ungedüngten Brachefläche auf 63,8 kg N/ha und bei der gedüngten Parzelle auf 84,3 kg N/ha.

Nur die Variante Senf gedüngt in Reinsaat weist mit 98,6 kg N/ha noch höhere N_{min} -Werte auf als die Brache gedüngt. In der ungedüngten Ausführung beläuft sich der N_{min} -Gehalt der Versuchsparzelle Senf in Reinsaat auf 34,6 kg N/ha.

Mit einem N_{min} -Wert von 69,6 kg N/ha hat die gedüngte Variante Winterbegrünung 1 den dritthöchsten N_{min} -Wert. In der ungedüngten Parzelle ist der N_{min} -Wert mit nur 34,9 kg N/ha deutlich geringer.

Bei der Variante Kresse/Mungo/Ölrettich gedüngt ist ein $N_{\min}$ -Gehalt von 59,6 kg N/ha zu verzeichnen. Die ungedüngte Ausführung hat einen $N_{\min}$ -Wert von 39,6 kg N/ha aufzuweisen.

Die niedrigsten $N_{\min}$ -Werte lassen sich bei der Variante Wassergüte früh in der gedüngten Teilfläche mit 44,1 kg N/ha erkennen. Die Wassergüte früh ungedüngt hat mit 37,0 kg N/ha den zweithöchsten $N_{\min}$ -Gehalt aller ungedüngten Varianten. Der Unterschied im $N_{\min}$ -Gehalt zwischen der gedüngten und ungedüngten Teilfläche ist bei dieser Variante mit 7,1 kg N/ha am geringsten.

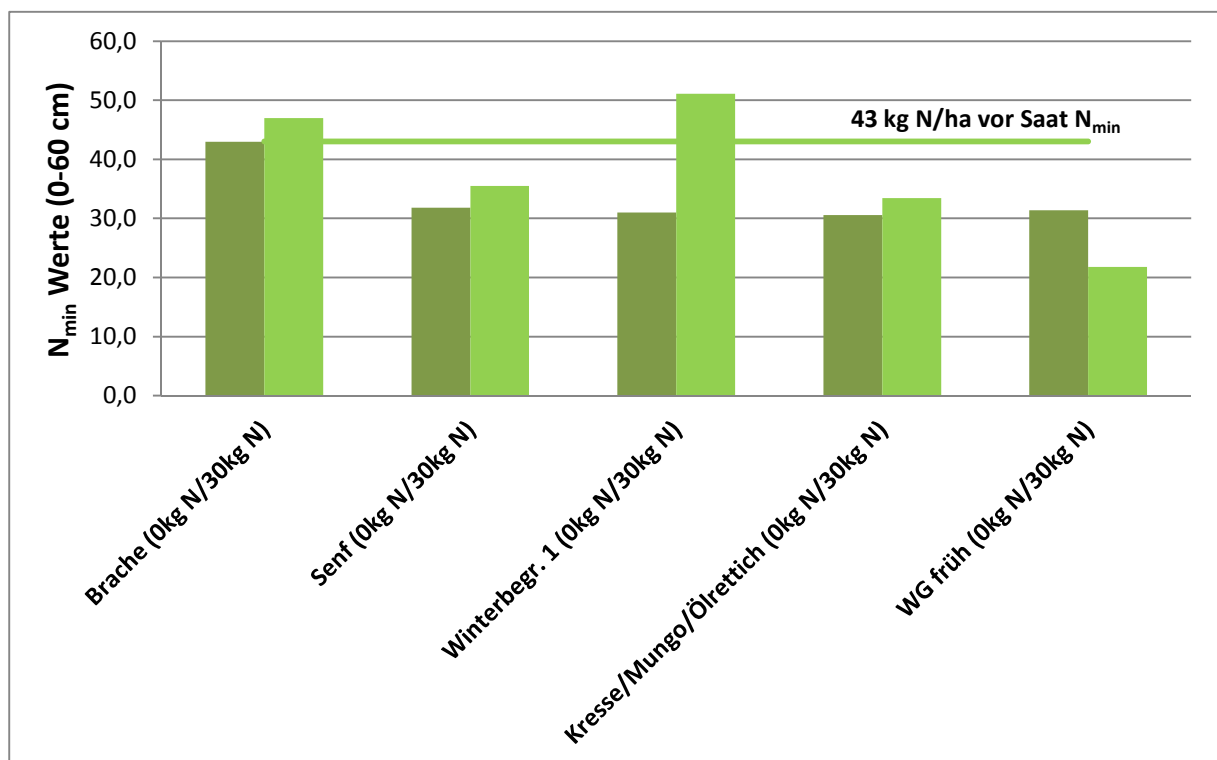


Abbildung 31 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Wulkaprodersdorf (kg N/ha).

Am Standort Wulkaprodersdorf (Abbildung 31) kann beobachtet werden, dass die gedüngten Varianten leicht höhere $N_{\min}$ -Werte aufweisen, als die ungedüngten. Einzige Ausnahme bildet hier die Wassergüte früh, wo die gedüngte Parzelle mit einem $N_{\min}$ -Gehalt von 21,8 kg N/ha niedriger ist, als die ungedüngte mit einem $N_{\min}$ -Wert von 31,4 kg N/ha.

Wie zu erwarten war, hat die Brache wenn man die Winterbegrünung 1 gedüngt mit einem $N_{\min}$ -Gehalt von 51,1 kg N/ha außer Acht lässt die höchsten $N_{\min}$ -Werte sowohl in der gedüngten Parzelle mit 47,0 kg N/ha, als auch in der ungedüngten Variante mit 43,0 kg N/ha aufzuweisen.

Die Variante Senf in Reinsaat gedüngt weist einen $N_{\min}$ -Gehalt von 35,5 kg N/ha auf. In der ungedüngten Teilfläche wurde ein $N_{\min}$ -Wert von 31,8 kg N/ha gemessen.

Wie schon kurz ausgeführt, beläuft sich der $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens der Variante Winterbegrünung 1 gedüngt auf 51,1 kg N/ha und ist somit der höchste $N_{\min}$ -Wert aller Varianten auf diesem Standort. Auf der ungedüngten Parzelle der Winterbegrünung 1 sind hingegen nur 31 kg N/ha ermittelt worden.

Die Variante Kresse/Mungo/Ölrettich gedüngt hat den dritthöchsten $N_{\min}$ -Gehalt mit 33,4 kg N/ha. In der ungedüngten Ausführung liegt er mit 30,6 kg N/ha leicht darunter.

In der gedüngten Parzelle hat die Wassergüte früh mit einem $N_{\min}$ -Wert von 21,8 kg N/ha den geringsten $N_{\min}$ -Wert von allen gedüngten Varianten. Der $N_{\min}$ -Gehalt der gedüngten Fläche ist niedriger als jener der ungedüngten Parzelle der Wassergüte früh mit 31,4 kgN/ha.

5.3.2. Standortsvergleich der $N_{\min}$ -Ergebnisse

Um die zentralen Einflussfaktoren herauszustreichen, die den Zwischenfruchteffekt auf den $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens prägen, werden im folgenden noch die Zweifach-Wechselwirkungen Variante*Ort, Variante*Düngung und Variante*Termin dargestellt.

In der Abbildung 32 kann der Unterschied der $N_{\min}$ -Werte zwischen den Orten und den einzelnen Varianten nachvollzogen werden. Besonders soll dabei der Vergleich zwischen dem Feucht- und Trockengebiet ermöglicht werden.

Die Abbildung 33 zeigt dagegen den Zusammenhang von Zwischenfrucht und Düngung.

Der Einfluss der Zwischenfruchtvariante auf die Veränderung des $N_{\min}$ -Gehaltes zwischen dem Herbst und dem Frühjahr ist in der Abbildung 34 dargestellt.

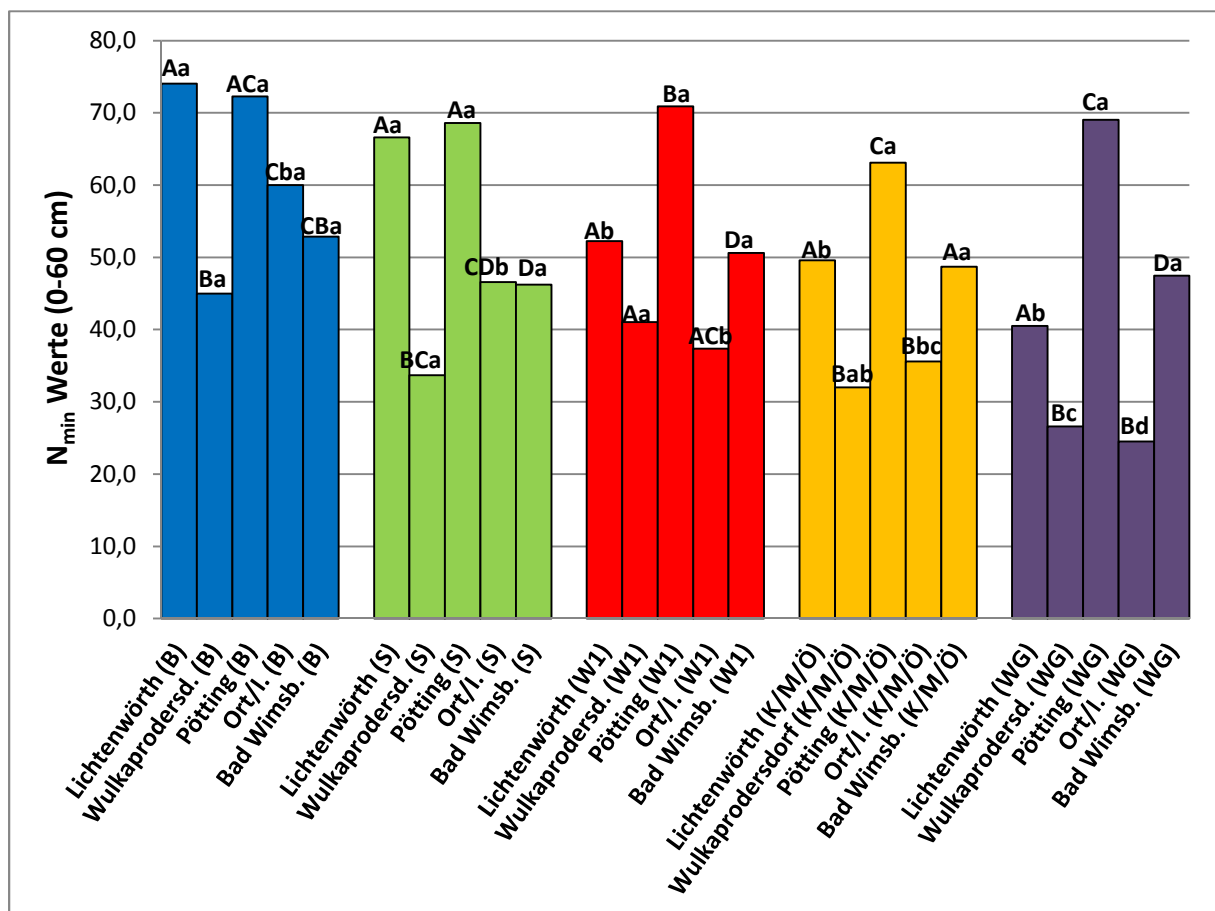


Abbildung 32 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm an den verschiedenen Standorten (kg N/ha). Die Großbuchstaben über den Säulen geben an, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen einer Variante auf den verschiedenen Orten besteht. Der Kleinbuchstabe dagegen gibt Auskunft über den statistisch signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten an einem Standort. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Bei allen Varianten (Abbildung 32) zeigt sich ein höherer $N_{\min}$ -Wert an den Standorten Lichtenwörth und Pötting. Dies weist auf die zentrale Bedeutung des Düngenniveaus hin. Die hohen $N_{\min}$ -Werte an diesen Standorten können auf die gute Versorgung mit Stickstoff aus dem Wirtschaftsdünger erklärt werden. So war auch der $N_{\min}$ -Gehalt bei der Vorsaatsbeprobung an diesen beiden Standorten am höchsten (85 kg N/ha in Lichtenwörth und 104 kg N/ha in Pötting). An den übrigen drei Standorten Wulkaprodersdorf, Ort/I. und Bad Wimsbach-Neydharting sind die $N_{\min}$ -Werte im Mittel gegenüber den anderen beiden um 20,6 kg N/ha geringer.

Die Standorte Pötting und Bad Wimsbach-Neydharting zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. An den Standorten Lichtenwörth, Wulkaprodersdorf und Ort/I. lag jeweils die Brache am höchsten und die Variante Wassergüte früh am niedrigsten.

In Lichtenwörth ähnelten sich die Brache und der Senf in Reinsaat mit höheren $N_{\min}$ -Werten und hoben sich von den übrigen Begrünungen ab, die wiederum untereinander keine signifikanten Unterschiede aufwiesen.

In Wulkaprodersdorf war die Differenzierung auf einem niedrigen $N_{\min}$ -Niveau gering. Unterschiede ergaben sich im Mittel nur zwischen der Variante Wassergüte früh mit dem geringsten $N_{\min}$ -Wert und den Varianten Brache und Winterbegrünung 1.

In Ort/I. zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Brache und den begrünten Parzellen. Die Begrünungsvarianten unterschieden sich dagegen untereinander nicht signifikant.

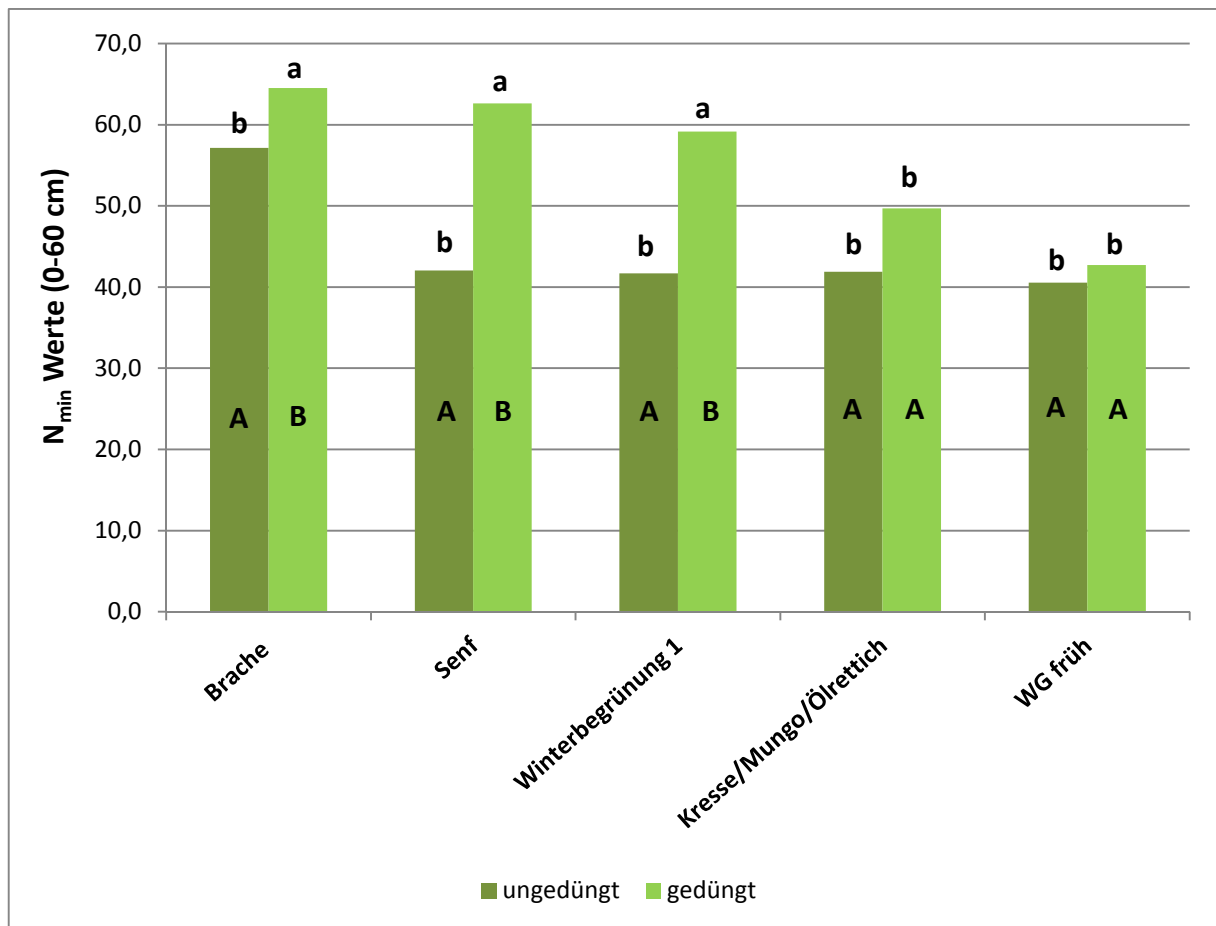


Abbildung 33 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den N_{min}-Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung (kg N/ha). Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb einer Variante mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

In der Abbildung 33 sind die N_{min}-Werte je Variante mit und ohne Düngung gemittelt über den Termin und alle Standorte dargestellt. Die Großbuchstaben in den Säulen geben den Unterschied zwischen einer gedüngten und ungedüngten Variante an. Hier lässt sich erkennen, dass die Varianten Schwarzbrache, Senf und Winterbegrünung 1 einen deutlichen Unterschied zeigen. Bei diesen Varianten erhöht eine Düngung mit 30 Kilogramm jahreswirksamen Stickstoff die N_{min}-Werte im Boden signifikant. Dies bedeutet, dass der gedüngte Stickstoff von den Pflanzen nicht in der zugeführten Menge aufgenommen werden kann und somit bei der Düngung dieser Varianten unter Umständen ein höheres Verlustpotential besteht. Betrachtet man nun die Varianten Kresse/Mungo/Ölrettich sowie die Mischung Wassergüte früh, so zeigt sich hier, dass eine Düngung zu keinen erhöhten N_{min}-Werten führt. In der statistischen Auswertung konnte hier kein Unterschied festgestellt werden. Diese beiden Varianten können den zugeführten Stickstoff effektiv verwerten und somit erhöht sich durch die Zuführung von Nährstoffen der Gehalt an mineralisiertem

Stickstoff im Boden nicht. Bei der Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich konnte auf allen Standorten ein sehr hoher Biomasseaufwuchs verzeichnet werden. Vor allem der Ölrettich dürfte hier für die Nährstoffaufnahme und dem damit verbundenem Wachstum verantwortlich sein. Die Mischung Wassergüte früh ist durch ihre gut abgestimmten Komponenten somit auch bei einer Düngung nicht gefährdet, erhöhte $N_{\min}$ -Gehalte zu zeigen.

Ebenfalls lassen sich alle Varianten je Düngestufe getrennt untereinander vergleichen. Dieser Mittelwertvergleich ist in der Abbildung 33 mit den Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen dargestellt. Es lassen sich hier eine große Anzahl von Unterschieden und Gemeinsamkeiten erkennen. Die Variante Brache unterscheidet sich von den Varianten Senf, Winterbegrünung 1, der Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich sowie Wassergüte früh hinsichtlich der $N_{\min}$ -Gehalte im Boden bei den ungedüngten Parzellen. Bei den gedüngten Varianten unterscheiden sich die Versuchsvarianten Schwarzbrache, Senf und Winterbegrünung 1 nicht voneinander. Erst die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich sowie die Wassergüte früh zeigen hier signifikante Unterschiede von den drei vorher genannten. Diese beiden Varianten weisen die geringsten $N_{\min}$ -Gehalte im Boden sowohl bei einer Düngung als auch ohne Düngung auf.

Betrachtet man die ungedüngten Varianten, so können hier also nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden. Die Brachefläche zeigt erhöhte $N_{\min}$ -Gehalte im Boden und unterscheidet sich von den anderen Varianten. Alle begrünten Flächen zeigen in der ungedüngten Variante keine Unterschiede. Sieht man also von einer Düngung ab, gibt es hinsichtlich des $N_{\min}$ -Gehaltes im Boden keine Unterschiede. Hier macht es folglich keinen Unterschied, welche Begrünung ausgesät wird und auch ein späterer Saattermin bei Senf hat hier keinen Einfluss.

Es lässt sich sagen, dass der Effekt der Düngung auf die Varianten nicht bei allen begrünten Flächen im Vergleich zur Schwarzbrache nachgewiesen werden konnte. Die Mischungen Senf und Winterbegrünung 1 mit den Mischungspartnern Senf und Phacelia unterscheiden sich von der Schwarzbrache nicht. Erst die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich und Wassergüte früh zeigten signifikante Unterschiede zu den anderen Varianten. Hier zeigt sich der Effekt der Begrünung zur Reduzierung des $N_{\min}$ -Gehaltes nur bei diesen beiden Mischungen. Der Senf in Reinsaat und die Winterbegrünung 1 mit einem hohen Senfanteil konnten den Gehalt an mineralisiertem Stickstoff im Boden nicht reduzieren. Umso überraschender ist das

Ergebnis der Mischung Wassergüte früh als Leguminosenmischung, da diese trotz der Stickstoffsammlung sehr niedrige $N_{\min}$ -Gehalte aufwies.

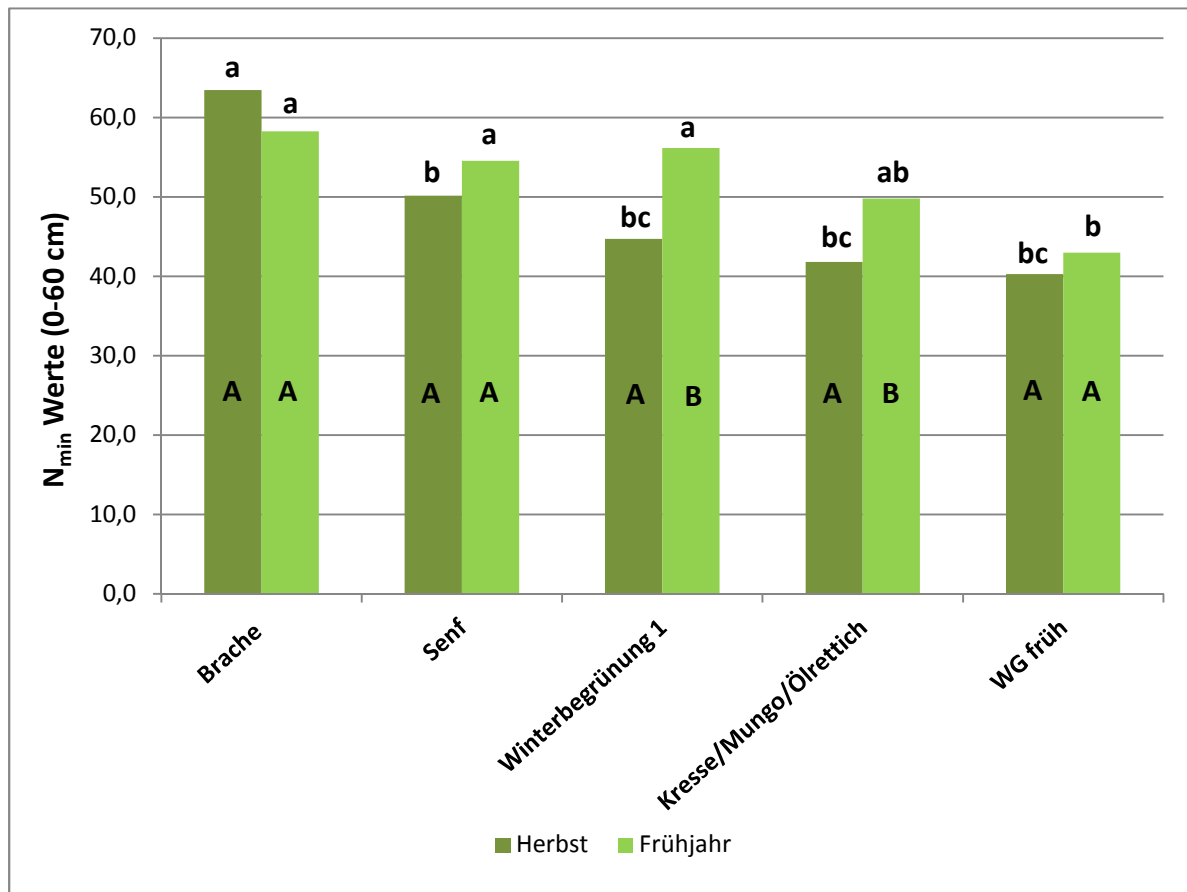


Abbildung 34 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit des Beprobungstermines (kg N/ha). Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen der Herbst- und Frühjahrsbeprobung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten im Herbst und Frühjahr an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

In der Abbildung 34 sind die $N_{\min}$ -Gehalte der Varianten abhängig vom Beprobungstermin dargestellt. Die Großbuchstaben in den Säulen geben den Unterschied in den $N_{\min}$ -Gehalten zwischen der Herbst- und Frühjahrsbeprobung an. Der Mittelwertvergleich getrennt nach dem Beprobungstermin ist in der Abbildung mit den Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen dargestellt. Gemittelt wurde hier über alle Standorte und die Düngung. Unterschiede in den $N_{\min}$ -Gehalten zwischen der Herbst- und Frühjahrsbeprobung konnten bei den Varianten Winterbegrünung 1 und Kresse/Mungo/Ölrettich festgestellt werden. Hier war der $N_{\min}$ -Gehalt im Frühjahr signifikant höher. Diese Tatsache lässt sich durch die beginnende Mineralisierung erklären.

Die Variante Brache wies sowohl im Herbst als auch im Frühjahr die höchsten $N_{\min}$ -Gehalte auf. Diese unterschied sich signifikant von allen anderen Varianten zur Herbstbeprobung. Hier zeigt sich wieder die Sinnhaftigkeit einer Begrünung, da in der Regel durch eine aktiv begrünte Fläche der Gehalt an mineralisiertem Stickstoff im Boden deutlich reduziert werden kann. So wurde zum Beispiel bei der Schwarzbrache im Herbst ein $N_{\min}$ -Gehalt von 62 Kilogramm gemessen und bei der Mischung Wassergüte früh nur etwa 40 Kilogramm Stickstoff je Hektar.

Über die Vorteilhaftigkeit einer einzelnen Begrünungsvariante kann nur schwierig Auskunft gegeben werden. Die Varianten ähneln einander sehr, aber die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich sowie Wassergüte früh scheinen in diesem Versuch den $N_{\min}$ -Gehalt im Boden zum Beprobungstermin im Herbst am deutlichsten zu reduzieren. Die Mischung Wassergüte früh zeigt sowohl im Herbst als auch im Frühjahr die niedrigsten $N_{\min}$ -Gehalte im Boden.

Bei der gedüngten Variante konnte nur bei der Mischung Wassergüte früh ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die anderen Varianten unterscheiden sich nicht voneinander.

5.4. Treibhausgasemissionen

5.4.1. Lachgasemissionen am Standort Pötting

Als bisher wenig beachtete Verlustkomponente von Stickstoff wurden die Lachgasemissionen von Zwischenfrüchten gemessen. Die angeführten Grafiken (Abbildung 37) zeigen die Lachgasemissionen zu den einzelnen Messzeitpunkten am Standort Pötting. Hier sind die Gasemissionen bei den einzelnen Varianten in der gedüngten und ungedüngten Variante in Form von Boxplots dargestellt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist zu beachten, dass laut Hr. Mentler (persönliche Mitteilung) Emissionen bis $5 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ als Hintergrundemission zu bezeichnen sind. Folglich sind Emissionen bis zu diesem Punkt als nicht erhöht zu bewerten. Für den Standort Pötting konnten in der statistischen Auswertung hinsichtlich der Lachgasemissionen signifikante Variantenunterschiede festgestellt werden (Tabelle 13). Ebenso ist die Wechselwirkung Zeit*Düngung signifikant, die im Anschluss an die Variantenunterschiede diskutiert wird.

Tabelle 13 Varianzanalyse Lachgas Pötting

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Zeit	2	13,99	0,0002
Düngung	1	28,95	< 0,0001
Zeit*Düngung	2	9,66	0,0014
Variante	4	2,91	0,0409
Zeit*Variante	8	2,20	0,0787
Düngung*Variante	4	1,18	0,3534
Zeit*Düngung*Variante	8	0,33	0,9420
Wiederholung	2	3,82	0,0515
Zeit*Wiederholung	4	2,41	0,0868

In der Abbildung 35 sind die Variantenunterschiede der Lachgasemissionen gemittelt über die Düngung und die Messtermine dargestellt. Es lässt sich auf den ersten Blick der einzige Unterschied erkennen. Die Emission von Senf zeigt hier signifikante Abweichungen von allen anderen Varianten. Erklärungen für diesen Variantenunterschied werden im Folgenden noch behandelt.

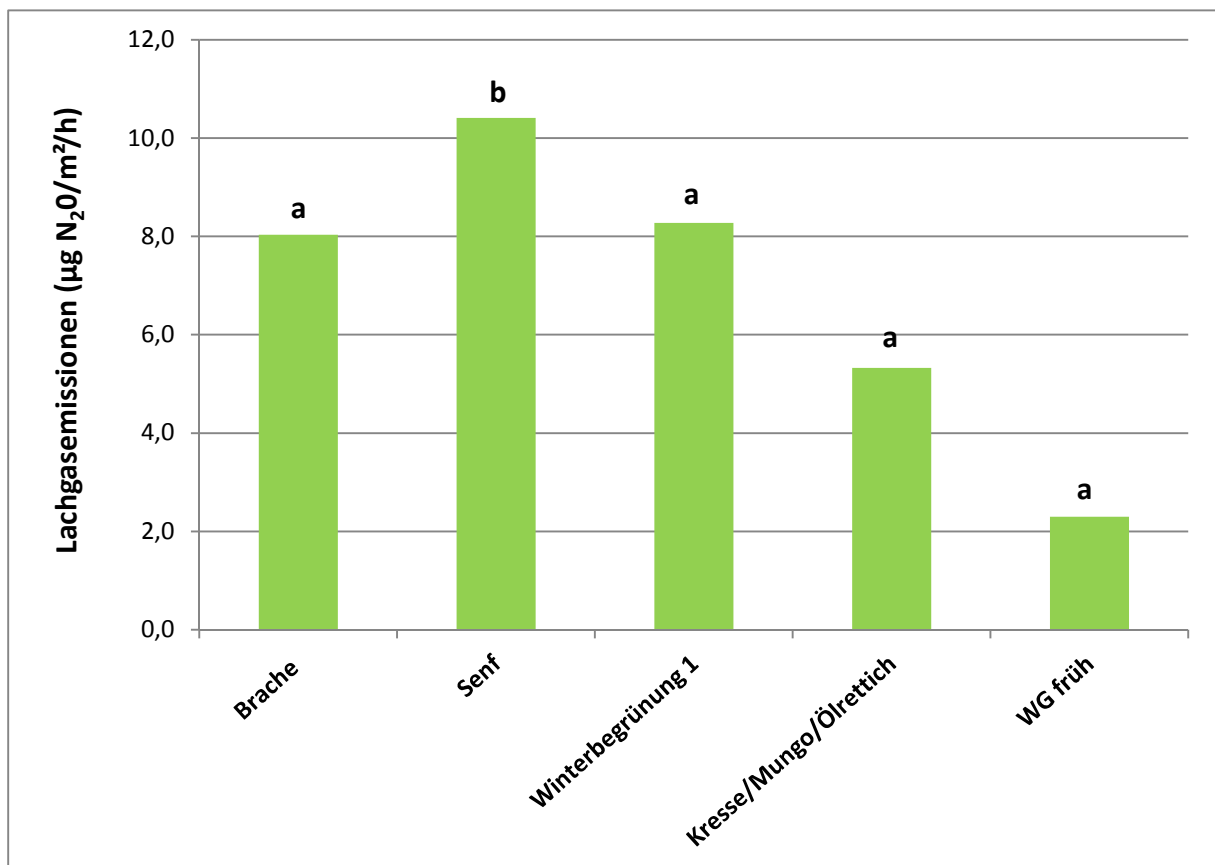


Abbildung 35 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf die Lachgasemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

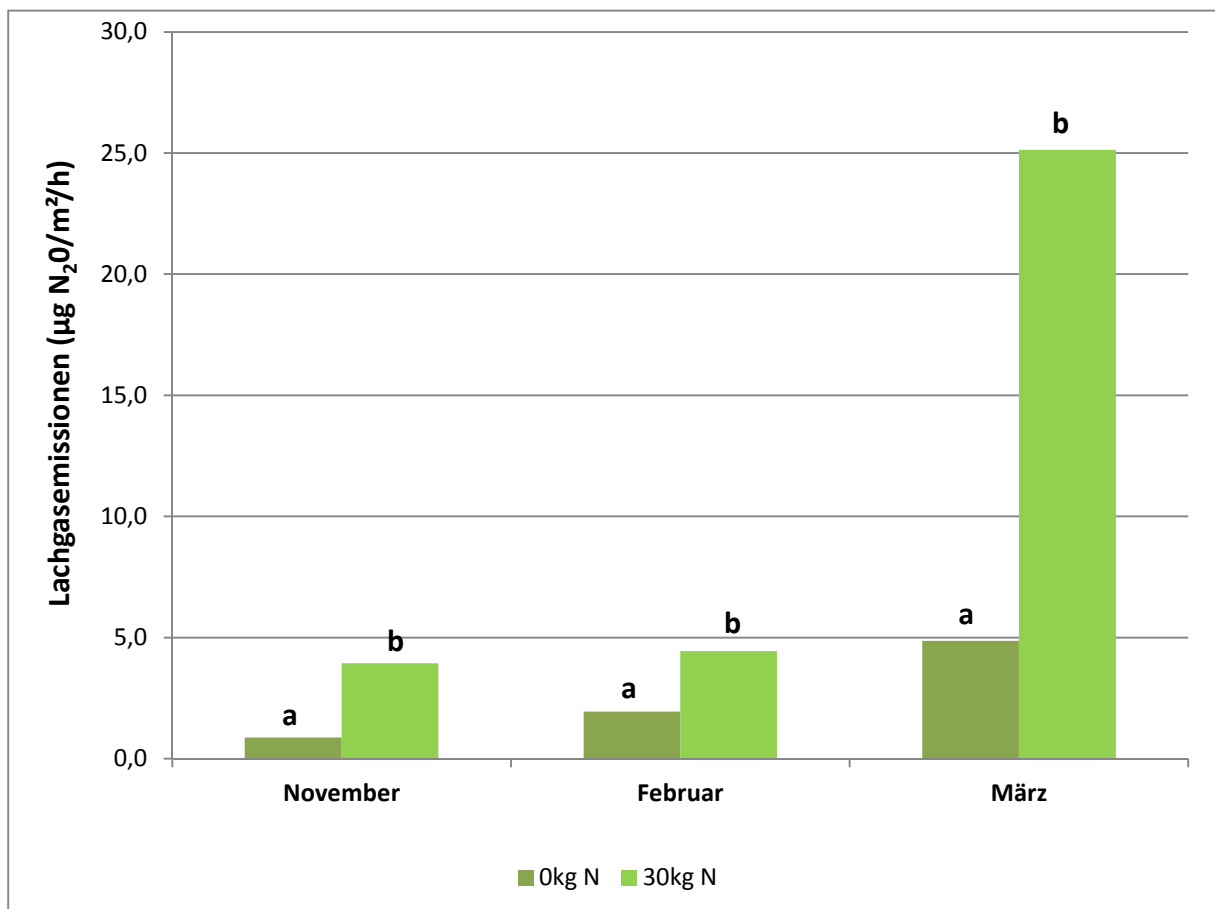


Abbildung 36 Einfluss der Düngung und des Beprobungstermines auf die Lachgasemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Die Lachgasemissionen unterscheiden sich hinsichtlich der Düngung zu den jeweiligen Messzeitpunkten, wie die Abbildung 36 zeigt. Eine Düngung führte zu einer Steigerung der gasförmigen Emissionen. Hierzu könnten verschiedene Faktoren beigetragen haben. Die Gülledüngung hat die Gehalte an mineralisiertem Stickstoff im Boden und den Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff erhöht. Auch könnte durch die Düngung die mikrobielle Tätigkeit im Boden verbessert worden sein. Alle diese Aspekte würden eine erhöhte gasförmige Emission bei Lachgas erklären.

Betrachtet man die Ergebnisse (Abbildung 37) der ersten Messung im November, so zeigen diese im Mittel mit $4,2 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ etwa die Hintergrundemission an Lachgas. Leicht erhöhte Emissionen zeigten die gedüngten Varianten Brache mit $5,9 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$, Senf mit $5,2 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ und Winterbegrünung 1 mit $6,2 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$. Die restlichen Versuchsvarianten zeigen keinerlei nennenswerte Emissionen.

Die Messung Anfang Februar zeigte ein ähnliches Bild wie die Messung im November. Bei einem Großteil der Messergebnisse konnte keine erhöhte Gasemission festgestellt werden, beziehungsweise lag diese im Mittel mit $4,9 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ unter der Hintergrundemission. Auffällig ist nur Senf in der gedüngten Variante, welche erhöhte Emissionswerte von $9,9 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ zeigte.

Bei der Messung am 7. März 2013 konnten die höchsten Gasemissionen gemessen werden. Hier war der Zeitpunkt der Messung nach einer Schneeschmelze mit sehr hohen Luft- und Bodentemperaturen ein typischer „hot moment“ für gasförmige Stickstoffverluste. Die gedüngten Varianten Senf und Winterbegrünung 1 zeigten mit $35,3 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ und $32,9 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ die höchsten gasförmigen Emissionen. Betrachtet man die gedüngten Flächen, so zeigen alle Varianten erhöhte gasförmige Emissionen. Im Mittel der Düngung emittierten zum Messzeitpunkt 25, $4 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$. Im Vergleich dazu emittierten die ungedüngten Varianten zum selben Zeitpunkt nur $6,5 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$.

Die Messung Anfang April zeigte hinsichtlich der Gasemissionen keine verwertbaren Ergebnisse. Aufgrund einer geringen Anzahl an verwertbaren Messdaten kann von einem Mess- oder Analysefehler ausgegangen werden.

Fasst man die Ergebnisse der Gasmessungen am Standort Pötting nun kurz zusammen, so kann bei Kreuzblütlern insbesondere bei Senf in Reinsaat von höheren gasförmigen Stickstoffverlusten ausgegangen werden. Ein Erklärungsansatz für diese höheren gasförmigen Verluste bei Senf hängt mit dem hohen Glucosinolatgehalt der Pflanzenbiomasse zusammen. Diese Glucosinolate enthalten Schwefel und dieser reduziert beim Abbau den Sauerstoffgehalt im Boden. Somit treten bei glucosinolathaltigen Pflanzen relativ rasch anaerobe Bedingungen im Boden auf und dies führt zu einer verstärkten Lachgasbildung. Da Glucosinolate, auch Senföle genannt, hauptsächlich aus Stickstoffverbindungen aufgebaut sind, liegt auch der Schluss nahe, dass diese für die Emissionen verantwortlich sind. Tatsächlich aber spielen diese Verbindungen im Vergleich zur Schaffung von aeroben Bedingungen durch den Schwefel nur eine untergeordnete Rolle.

Die Mischung ohne Kreuzblütler beziehungsweise die Kontrollvariante Schwarzbrache zeigte die niedrigsten gasförmigen Emissionswerte. Da die erhobenen Emissionen allerdings nur genau für diesen Zeitpunkt der Messung gelten, geben sie noch keinen quantitativen Hinweis auf die Summe der gasförmigen Stickstoffverluste bei Zwischenfruchtbegrünungen. Auch die Messergebnisse zu günstigen Bedingungen für gasförmige Emissionen stellen keine hohen Emissionsraten dar. Man darf auch nicht vergessen, dass ideale Bedingungen für gasförmige Verluste möglicherweise im Feld nur sehr kurz andauern und daher die Emissionen zeitlich beschränkt sind. Was allerdings gesagt werden kann ist, dass Senf in Reinsaat im Vergleich zu Mischungen mit Senf (z.B. Senf und Phacelia) bereits höhere Emissionen zeigt. Dies bedeutet, dass Mischungen mit mehreren Komponenten auch hinsichtlich gasförmiger Verluste zu bevorzugen sind. Begrünungen mit mehreren Mischungspartnern im Allgemeinen zeigen nur ein geringes Potential für gasförmige Stickstoffverluste, und auch Senf kann in Mischungen mit einer angepassten Saatmenge ohne Gefahr von erhöhten gasförmigen Emissionen eingesetzt werden.

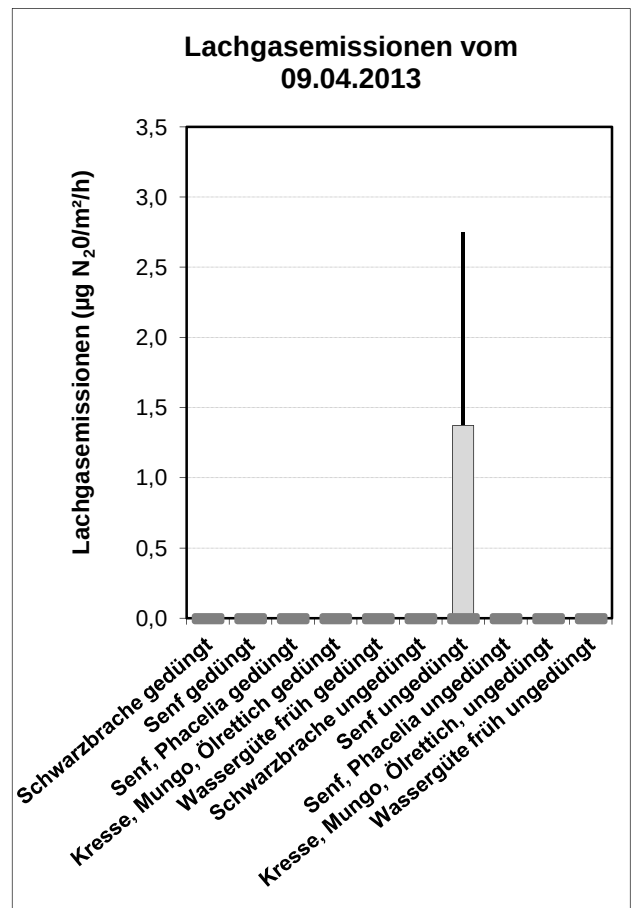
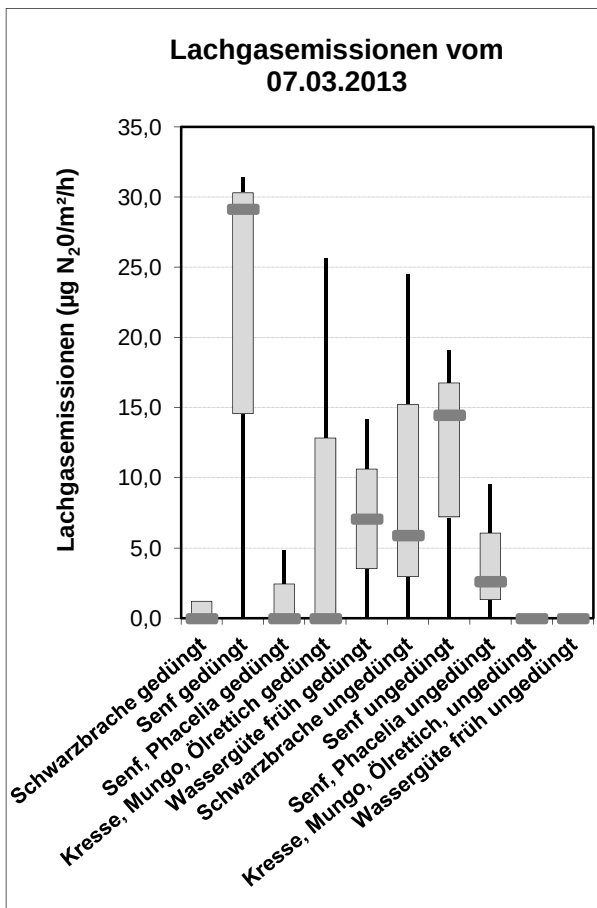
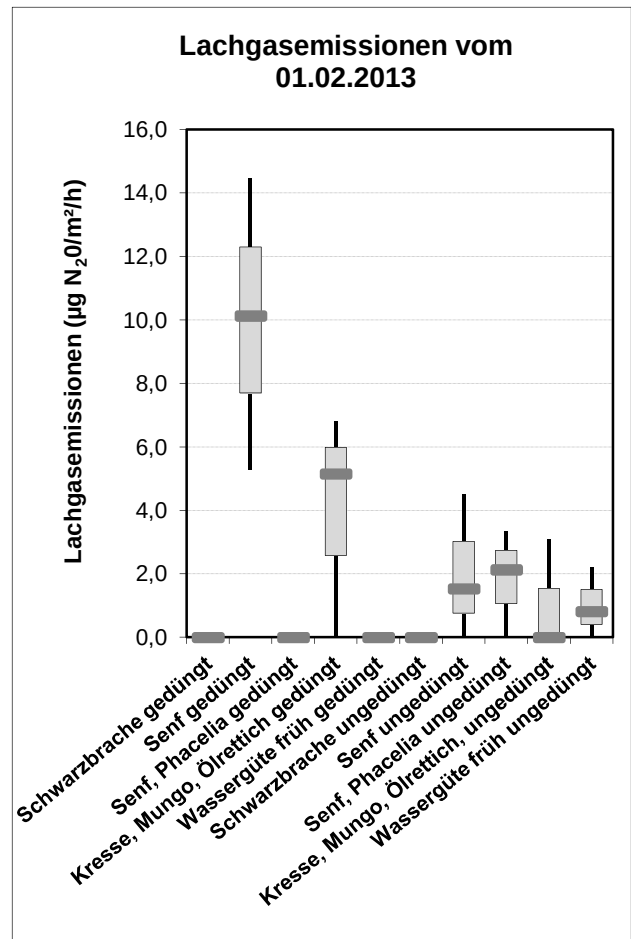
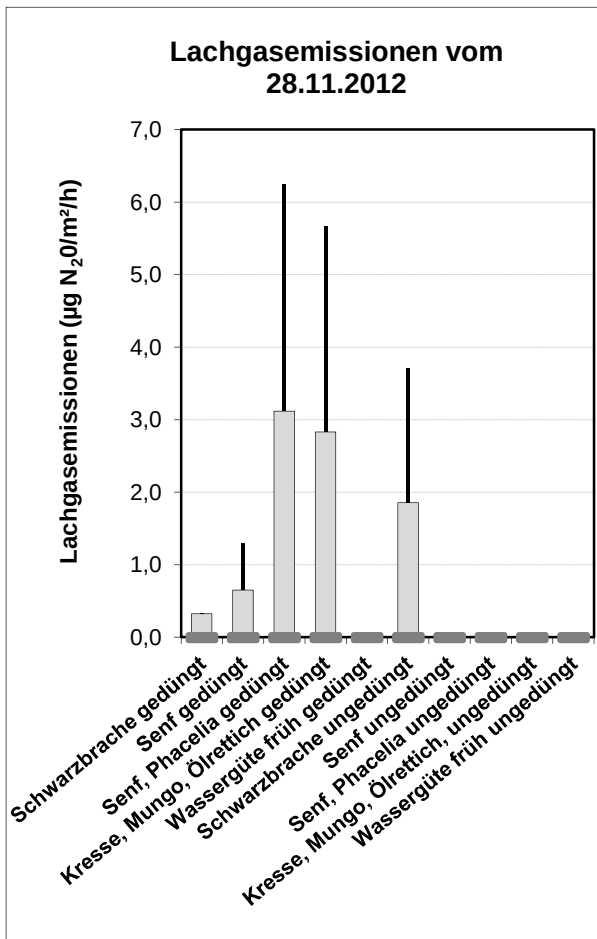


Abbildung 37 Lachgasemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Pötting)

5.4.2. Kohlendioxidemissionen am Standort Pötting

Neben den gasförmigen Stickstoffverlusten wurden auch die Kohlendioxidemissionen erhoben. Die Kohlendioxidemissionen am Standort Pötting zeigten einen signifikanten Varianten- und Düngeeffekt (Tabelle 14). Ebenfalls ist die Wechselwirkung Zeit*Variante als signifikant zu bezeichnen.

Tabelle 14 Varianzanalyse Kohlendioxid Pötting

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Zeit	2	176,44	< 0,0001
Düngung	1	21,01	0,0002
Zeit*Düngung	2	3,11	0,0693
Variante	4	2,85	0,0414
Zeit*Variante	8	4,75	0,0029
Düngung*Variante	4	0,55	0,7006
Zeit*Düngung*Variante	8	1,16	0,3745
Wiederholung	2	0,76	0,4807
Zeit*Wiederholung	4	0,54	0,7083

Die Wechselwirkung Zeit*Variante ist in der Abbildung 38 dargestellt. Betrachtet man die Emissionen der jeweiligen Varianten zu den drei Messterminen, so lassen sich bei der Variante Brache keine Unterschiede zwischen den Terminen feststellen. Alle anderen Varianten zeigen bei der Messung im Februar im Vergleich zu den anderen Messterminen signifikante Unterschiede. Dieser Messtermin ist durch sehr geringe gasförmige Emissionen gekennzeichnet. Hier dürften die Umweltbedingungen nicht optimal für Lachgasemissionen gewesen sein. Außerdem zeigt die Abbildung, dass sich die Variante Schwarzbrache von allen anderen Varianten hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen unterscheidet. Die Emissionen sind bei der Schwarzbrache geringer als bei allen anderen Varianten. Aufgrund des fehlenden Biomasseaufwuchses lässt sich dieses Ergebnis sehr einfach erklären.

In der Abbildung 39 ist der Düngeeffekt dargestellt. Die Kohlendioxidemissionen unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der Düngung. Die Zufuhr von Stickstoff führte zu erhöhten Kohlendioxidemissionen, was sich unter Umständen durch eine vermehrte Mikroorganismenaktivität und eine höhere Biomassebildung erklären lässt.

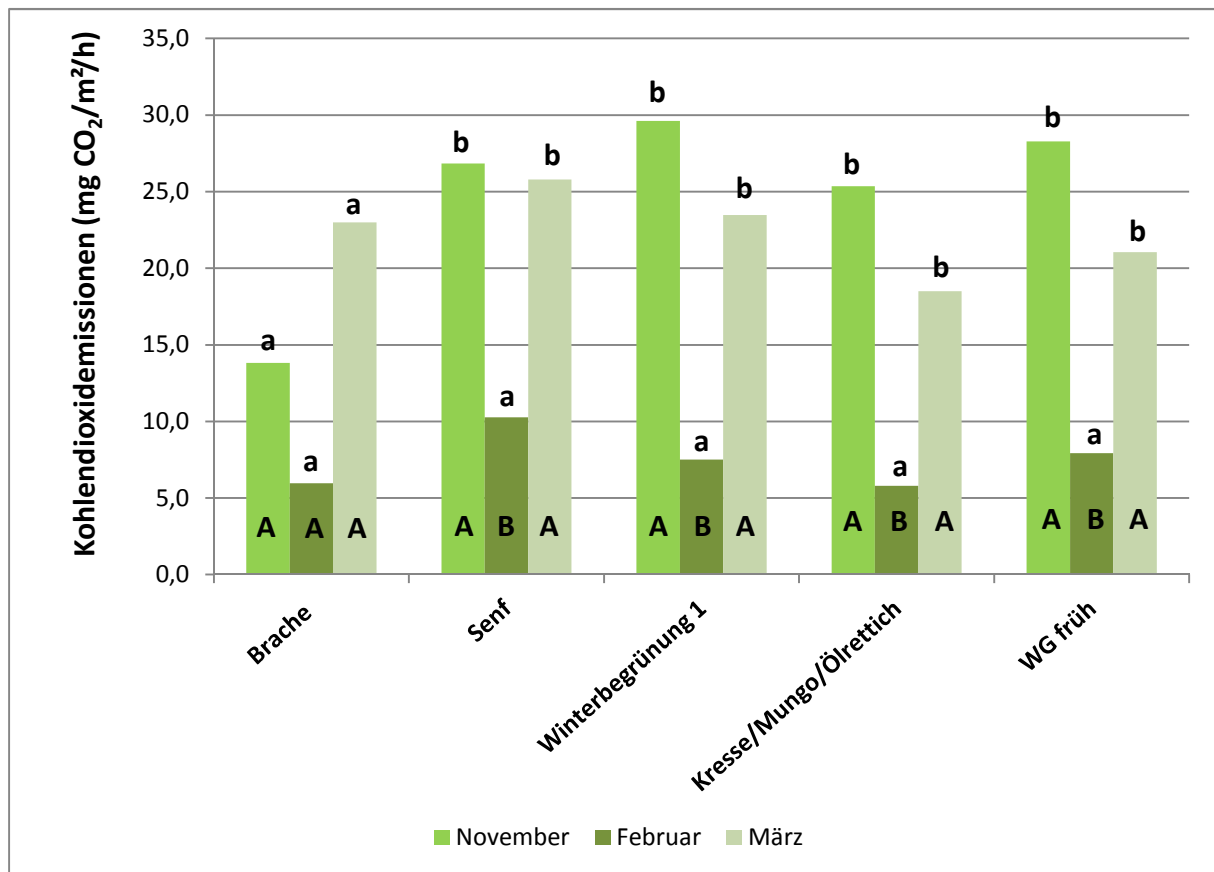


Abbildung 38 Einfluss der Zwischenfrucht auf die Kohlendioxidemissionen in Abhängigkeit der Variante und des Beprobungstermines. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

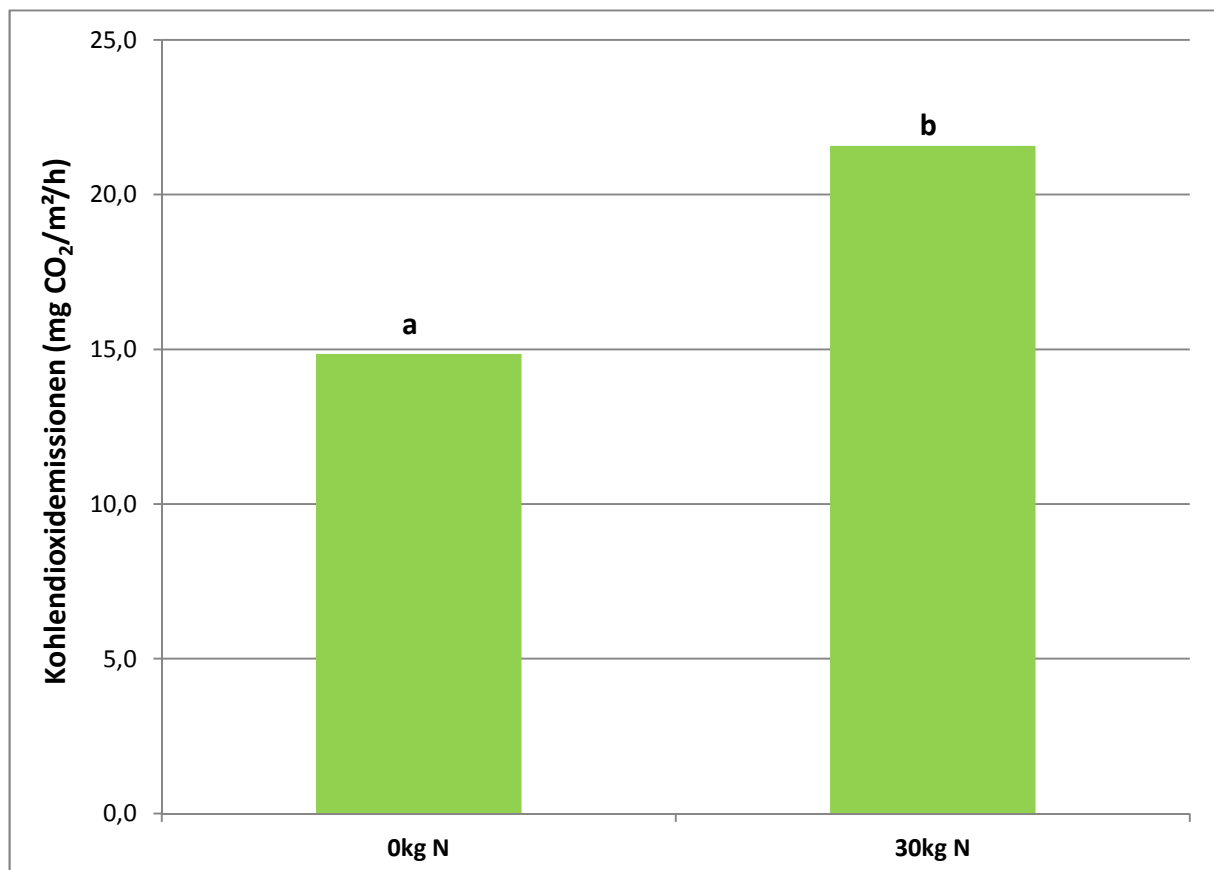


Abbildung 39 Einfluss der Düngung auf die Kohlendioxidemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

Die einzelnen Grafiken (Abbildung 40) zeigen die Kohlendioxidemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten. Die Messung im Herbst und die Messung im März zeigten die höchsten Verluste. Im Herbst konnte eine Kohlendioxidemission von 22,7 mg CO₂/m²/h und im Frühjahr von 22,4 mg CO₂/m²/h festgestellt werden. Die Emissionen im Herbst lassen sich durch die noch vorhandene Tätigkeit von Mikroorganismen erklären. Bei der Messung im Herbst ist auch noch die pflanzliche Stoffwechselaktivität wie Wurzelatmung von noch lebender Pflanzenmasse zu beachten. Obwohl die durchschnittliche Bodentemperatur bei nur mehr rund 7 Grad Celsius lag, konnten hohe Kohlendioxidemissionen gemessen werden. Neben den hohen Lachgasemissionen konnten bei der Messung im März auch hohe Kohlendioxidemissionen verzeichnet werden. Diese Tatsache untermauert auch die Ergebnisse der Lachgasmessung, da zu diesem Zeitpunkt die Mikroorganismen-Tätigkeit nach der Schneeschmelze, verbunden mit den hohen Temperaturen, zu einem sprunghaften Anstieg der Emissionen führte. Ein weiterer möglicher Interpretationsansatz ist, dass es nach der Schneeschmelze zu einem Entweichen der Gase gekommen ist, die vorher von der Schneedecke im Boden gehalten wurden. Da der Boden im Frühjahr 2013 aufgrund des vorher gefallenen Schnees nie durchgefroren war, ist dieser Ansatz durchaus denkbar.

Die Ergebnisse der beiden anderen Messtermine fielen nicht so deutlich aus. Am 1. Februar konnte eine Emission von 7,7 mg CO₂/m²/h gemessen werden. Hier dürfte die Tätigkeit der entsprechenden Mikroorganismengruppen im Boden sehr gering gewesen sein, was auch durch eine niedrige Bodentemperatur von nur rund 6° Celsius erklärbar ist. Die Messung im April zeigte ebenfalls keine deutlichen Ergebnisse. Hier muss wie beim Lachgas auch auf den möglichen Probe- oder Analysefehler hingewiesen werden.

Fasst man die Ergebnisse der Kohlendioxidemissionen zusammen, so kann man sagen, dass die Emissionen im Versuchszeitraum als gering einzustufen sind. Ursache dafür ist sicherlich die niedrige Bodentemperatur und somit die geringere mikrobielle Tätigkeit.

Die unterschiedlichen Mischungen emittierten zu den vier Messzeitpunkten unterschiedliche Mengen an Kohlendioxid. Betrachtet man die Ergebnisse genauer, so treten die geringsten Emissionen bei der Schwarzbrache auf. Dies lässt sich durch den fehlenden Bewuchs und der damit nicht vorhandenen Zufuhr an organischer Substanz erklären. Demzufolge sind aber die Emissionen der Variante Schwarzbrache als Nettoverluste zu interpretieren. Die begrünten Varianten emittierten signifikant mehr Kohlendioxid als die Schwarzbrache. Dieser Verlust ist

allerdings durch die Zufuhr von organischem Material als normal anzusehen und stellt keinen Vorteil für die Schwarzbrache dar. Bei begrünten Flächen wird beim Pflanzenwachstum eine große Menge an Kohlenstoff gebunden und so kann auch später in der vegetationsfreien Zeit mehr Kohlendioxid emittiert werden. Folglich können Begrünungen Kohlenstoff kurzzeitig speichern, diesen aber teilweise wohl auch in stabiler Form für die Humusreproduktion zur Verfügung stellen.

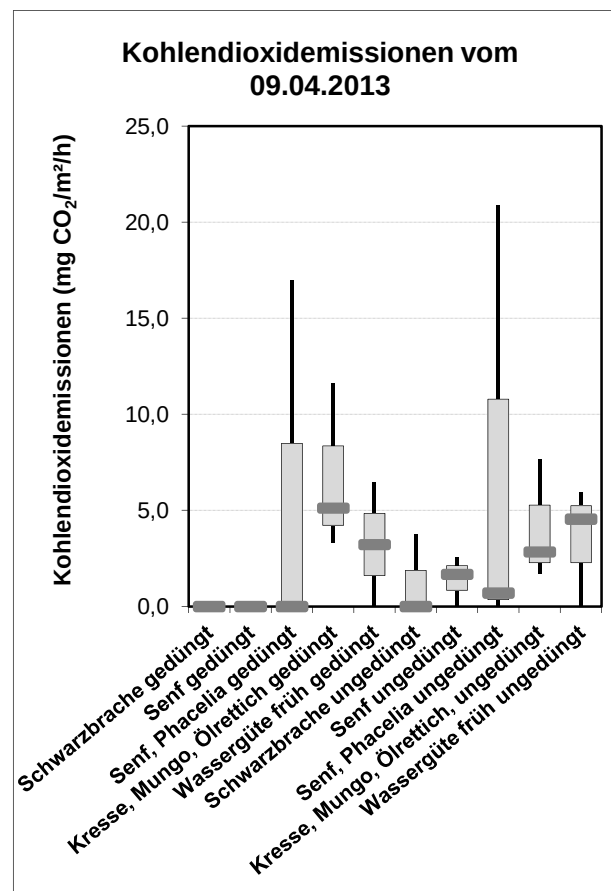
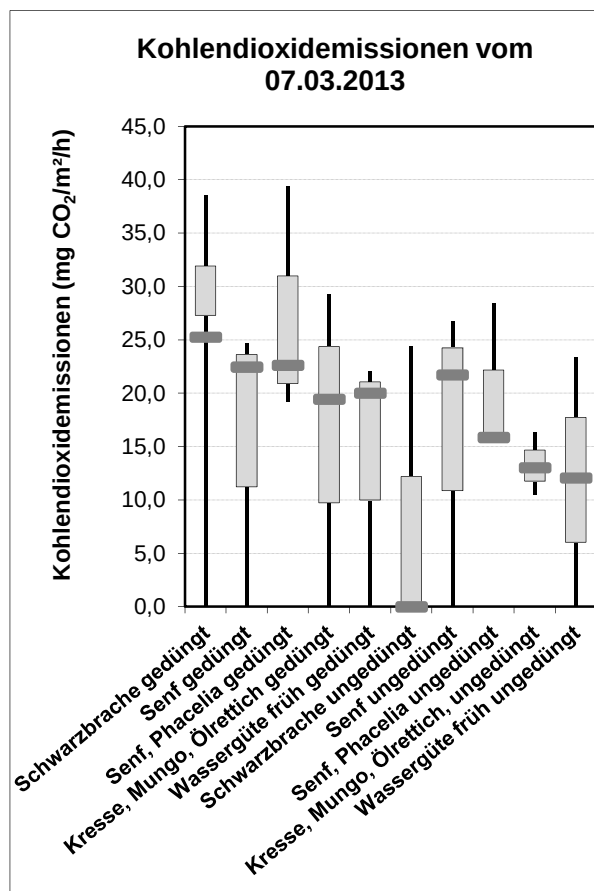
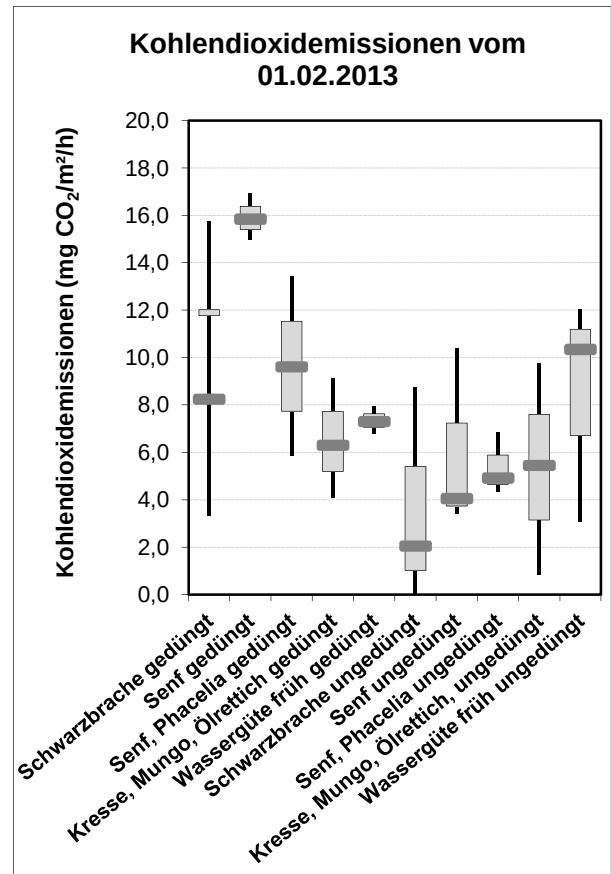
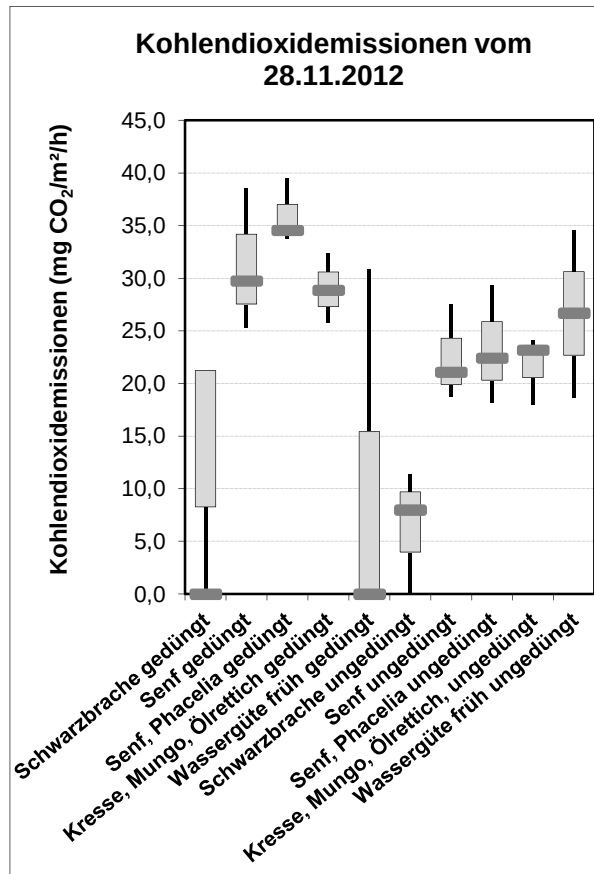


Abbildung 40 Kohlendioxidemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Pötting)

5.4.3. Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit am Standort Pötting

Gasförmige Emissionen sind stark von der Witterung, vor allem aber von der Bodentemperatur und dem Bodenwassergehalt anhängig. Die Messungen erfolgten daher zumeist zu Zeitpunkten, die hohe Emissionen erwarten ließen. Die Messung im November erfolgte am Ende der Vegetationsperiode. Hier lag ein deutliches Niederschlagsdefizit im langjährigen Mittel vor und somit auch ein relativ niedriger Bodenwassergehalt von 31 Volumsprozents (Abbildung 42). Die weiteren beiden Messungen im Februar und März wurden nach einer Schneeschmelze durchgeführt und somit bei einer hohen

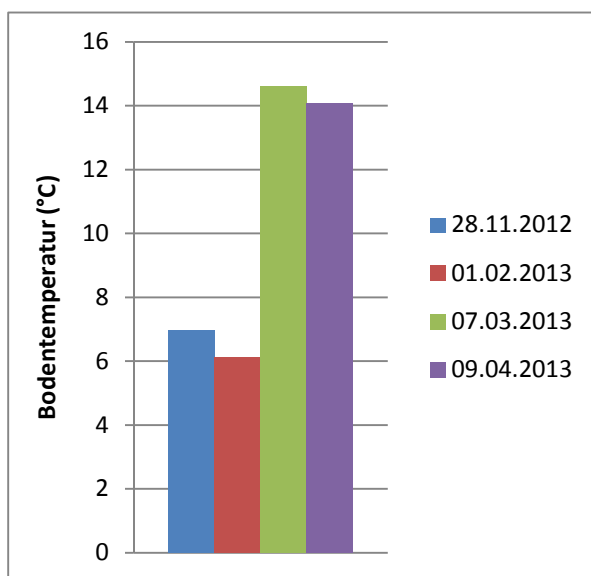


Abbildung 41 Mittelwert Bodentemperatur

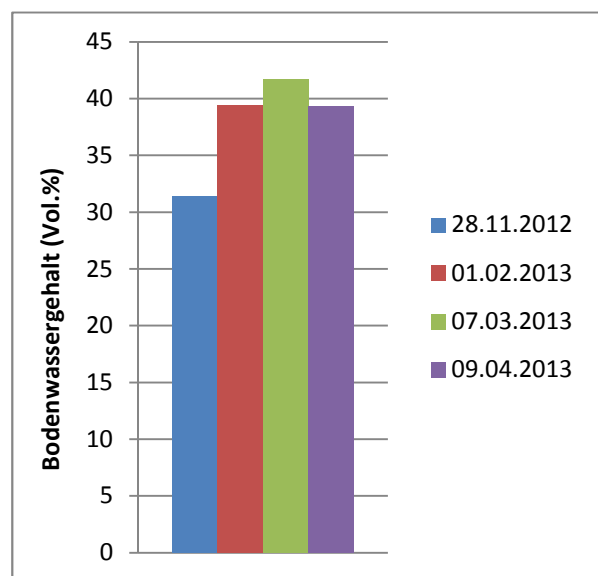


Abbildung 42 Mittelwert Bodenwassergehalt

Wassersättigung des Bodens. So waren hier Bodenwassergehalte von 39 und 41 Vol.% messbar. Hier erwarteten wir, aufgrund des Faktums, dass gerade bei Tauperioden hohe Emissionen feststellbar sind, ein deutlich erhöhtes Emissionspotenzial. Die Messung im April erfolgte schließlich zu Beginn der Vegetationsperiode nach ausgiebigen Niederschlägen, wobei im langjährigen Durchschnitt dieser Monat trocken war.

Die Mittelwerte der Bodentemperaturmessung (Abbildung 41) zeigen, dass bei den ersten beiden Messungen niedrige Bodentemperaturen von rund 6 Grad Celsius gemessen wurden. Die letzten beiden Messungen im März und April erfolgten bei deutlich höheren Bodentemperaturen von rund 14 Grad Celsius. Bei der Messung im März 2013 wurden die höchsten absoluten Gasemissionen festgestellt. Dieses Ergebnis lässt sich wahrscheinlich durch die gegebene hohe Bodentemperatur und den hohen Bodenwassergehalt erklären.

Die Messung wurde unmittelbar nach einer starken Tauperiode, bedingt durch die hohen Temperaturen, durchgeführt. Somit waren ideale Bedingungen für Gasemissionen gegeben, was sich in der Messung deutlich widerspiegelte.

5.4.4. Lachgasemissionen am Standort Lichtenwörth

Die Messungen vom 01.02.2013 und 06.03.2013 wurden sofort nach der Schneeschmelze durchgeführt, da in relativ kurzer Zeit (1 bis max. 3 Tage) die höchsten Lachgasmissionen auftreten („hot moments“). So konnten bei diesen beiden Messungen erwartungsgemäß die höchsten Lachgasemissionen verzeichnet werden, wobei die Emissionen vom Februar im Mittel mit $11,8 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ höher waren als die vom März mit $4,8 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$. Dies könnte auf den um 2 Vol.% höheren Wassergehalt des Bodens im Februar gegenüber dem vom März zurückgeführt werden, obwohl die Bodentemperatur im März fast doppelt so hoch war wie im Februar. Ein weiterer Grund könnte ein möglicherweise gefrorener Boden oder eine gefrorene Bodenoberfläche im Februar gewesen sein.

Tabelle 15 Varianzanalyse Lachgas Lichtenwörth

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Zeit	2	6,62	0,007
Düngung	1	0,55	0,4698
Zeit*Düngung	2	1,50	0,2488
Variante	4	0,34	0,8495
Zeit*Variante	8	1,90	0,1223
Düngung*Variante	4	0,99	0,4405
Zeit*Düngung*Variante	8	2,11	0,0900
Wiederholung	2	0,47	0,6337
Zeit*Wiederholung	4	2,93	0,0599

Die statistische Auswertung der Kohlendioxid- und Lachgasemissionen hat gezeigt, dass am Versuchsstandort Lichtenwörth lediglich beim Vergleich der Kohlendioxidemissionen signifikante Unterschiede innerhalb der Varianten beobachtet werden können. Die Tabelle 15 zeigt die Varianzanalyse des Lachgases am Standort Lichtenwörth.

Die nachfolgenden Graphiken (Abbildung 43) stellen die Lachgasemissionen der vier Messungen am Standort Lichtenwörth dar. Für die Darstellung wurden Boxplots verwendet, um die Verteilung der Werte besser veranschaulichen zu können. Wie schon erwähnt sind

Lachgasemissionen bis $5 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ als Hintergrundemission zu betrachten. Daher wird auf Werte bis zu dieser Emission nicht näher eingegangen. Weiters zeigen die Boxplots die Emissionen der einzelnen Varianten sowohl bei der gedüngten, als auch bei der ungedüngten Teilfläche des Versuches.

Die erste Messung der Lachgasemissionen fand Ende November 2012 statt. Aufgrund fehlender anaerober Bedingungen (Wassergehalt: 24 Vol.%) lagen fast alle Werte unter der Hintergrundemission von $5 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$. Nur zwei Varianten Winterbegrünung 1 ungedüngt und die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich ungedüngt lagen mit rund 6,7 und $5,8 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ leicht über der Hintergrundemission.

Die nächste Messung Anfang Februar zeigte am Standort Lichtenwörth die höchsten Emissionen in Form von Lachgas. Diese Messung wurde unmittelbar nach der Schneeschmelze durchgeführt. Die Bodentemperatur lag hier allerdings im Mittel aller Varianten mit $7,1^\circ\text{C}$ am niedrigsten von allen Messterminen, wobei der Bodenwassergehalt im Mittel mit 29 Vol.% der höchste aller vier Messtermine war. Daher könnten diese erhöhten Lachgasemissionen mit dem hohen Bodenwassergehalt in Zusammenhang gebracht werden. Der Senf gedüngt in Reinsaat hat mit $24,7 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ die höchsten Emissionen aller Varianten. Die gedüngten Varianten bewegen sich alle innerhalb der Hintergrundemission bzw. zeigen überhaupt keine Emissionen. Bei den ungedüngten Varianten zeigt wiederum der Senf in Reinsaat mit $17,8 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ die höchsten Lachgasemissionen. Ihm folgt die Winterbegrünung 1 mit $13,1 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$, die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich mit $11,1 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ und die Wassergüte früh mit $7,2 \mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ nach. Das heißt somit, dass sich alle ungedüngten Varianten außer der Schwarzbrache über der Hintergrundemission bewegen. Die Lachgasemissionen sind bei den ungedüngten Varianten höher, obwohl der N_{min} -Gehalt bei den gedüngten im Mittel mit $71,2 \text{ kg N/ha}$ doppelt so hoch ist, als bei den ungedüngten mit $35,0 \text{ kg N/ha}$. Der N_{min} -Gehalt kann also demnach nicht für die hohen Emissionen verantwortlich sein, wobei laut Literatur ein hoher N_{min} -Gehalt hohe Lachgasemissionen verursacht. Der DOC-Gehalt ist aber bei den ungedüngten Varianten im Mittel mit $40,1 \text{ mg/l}$ höher, als bei den gedüngten mit $27,5 \text{ mg/l}$. Dies könnte der Grund für die höheren Emissionen bei den ungedüngten Varianten sein. Die höheren DOC-Gehalte bei den ungedüngten Varianten sind allerdings durch die Literatur nicht begründbar, da bei einer Düngung mit organischen Düngemitteln (z.B. Gülle) die DOC-

Gehalte höher sein müssten, als auf den ungedüngten Flächen. Bei beiden Varianten zeigte Senf in Reinsaat jedenfalls die höchsten Lachgasemissionen. Die im Gegensatz zu den anderen Varianten erhöhten Emissionen beim Senf lassen sich nur bei Senf in Reinsaat beobachten. Vergleicht man die anderen drei Varianten, in denen Kreuzblütler vorkommen, so kann gesagt werden, dass nur der Senf in Reinsaat größere Unterschiede gegenüber den Varianten Winterbegrünung 1 und der Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich aufweist. Demnach sind Mischungen mit Kreuzblütlern kein Problem im Hinblick auf Lachgasemissionen. Hinsichtlich der Schwarzbrache scheint der fehlende Pflanzenbestand die Lachgasverluste, möglicherweise aufgrund der geringeren Substratverfügbarkeit für Mikroorganismen, zu vermindern. Jedoch ist mit einer verstärkten Auswaschung des Stickstoffes in Form des Nitrates zu rechnen.

Die dritte Messung fand Anfang März statt. Die Bodentemperatur lag bei 13°C und ist somit fast doppelt so hoch wie im Februar. Der Bodenwassergehalt ist mit 26 Vol.% um 2 Vol.% niedriger als im Februar. Gesamt betrachtet liegen die Lachgasemissionen deutlich unter jenen vom Februar. Dabei sind Unterschiede im Mittel von 7 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ zu beobachten. Dies könnte auf den geringeren Bodenwassergehalt zurückgeführt werden, wobei die Bodentemperatur fast doppelt so hoch war wie im Februar. Somit dürfte der Bodenwassergehalt eine größere Rolle im Hinblick auf die Lachgasentwicklung gespielt haben, als die Bodentemperatur. Der Senf in Reinsaat hat in der ungedüngten Form mit 6,7 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ die höchsten Lachgasemissionen innerhalb der ungedüngten Varianten. Bei den gedüngten Varianten hat die Winterbegrünung 1 mit 7 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ die höchsten Emissionen. Alle Varianten sowohl in der gedüngten, als auch in der ungedüngten Teilfläche wiesen demnach Emissionen nur leicht über bzw. unter der Hintergrundemission von 5 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ auf. Die vierte und letzte Messung wurde Mitte Mai mit dem Ziel, die Messung nach einem größeren Niederschlagsereignis zu machen, durchgeführt. Mit einer Bodentemperatur von 21°C und einem Bodenwassergehalt von 21 Vol.% wurden, bis auf den Senf ungedüngt mit 3,2 $\mu\text{g N}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{h}$ keine Lachgasemissionen mehr gemessen. Trotz des Niederschlages vor der Messung und einer Düngung zur Aussaat wurden keine Emissionen verzeichnet.

Betrachtet man zum Schluss nochmals kurz die vier Termine im Vergleich, so kann gesagt werden, dass die Lachgasemissionen am Standort Lichtenwörth als gering zu bewerten sind.

Nennenswerte Emissionen sind nur beim Senf in Reinsaat aufgetreten. Alle anderen Varianten zeigten Lachgasemissionen nur in der Größe der Hintergrundemission. Senf bzw. Kreuzblütler als Mischungskomponente zeigen geringere Werte als Senf in Reinsaat. Folglich stellen Kreuzblütler in Mischungen kein Problem für die Lachgasemissionen dar. Höhere Emissionen sind nur im Februar und im März unmittelbar nach der Schneeschmelze bzw. dem Auftauen des Bodens gemessen worden. So stimmen unsere Messergebnisse mit den Erwartungen der Literatur entsprechend überein.

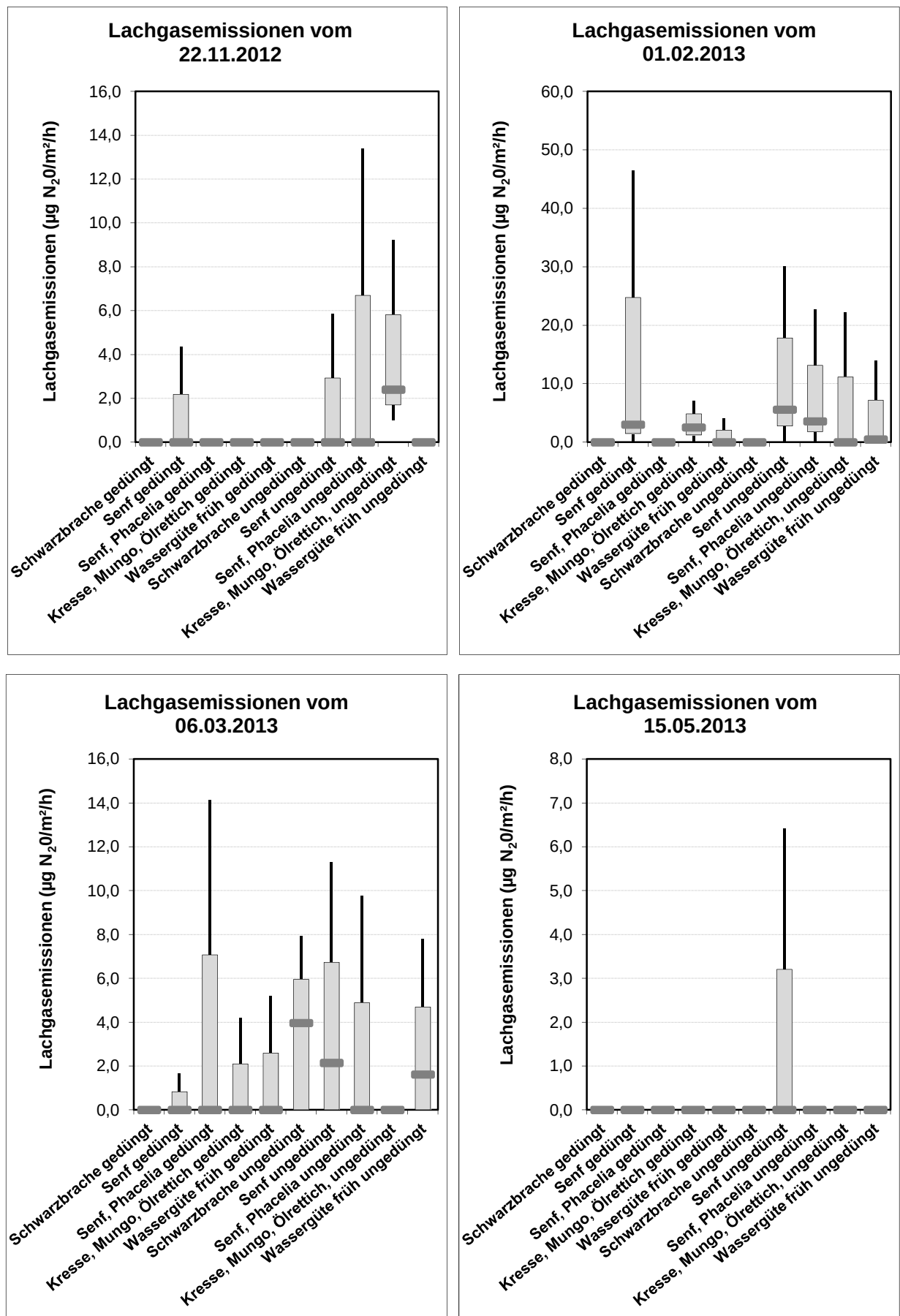


Abbildung 43 Lachgasemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Lichtenwörth)

5.4.5. Kohlendioxidemissionen am Standort Lichtenwörth

Im Gegensatz zu den Lachgasemissionen zeigen die Kohlendioxidemissionen einen signifikanten Unterschied zwischen den einzelnen Versuchsvarianten (Tabelle 16).

Tabelle 16 Varianzanalyse Kohlendioxid Lichtenwörth

Varianzursache	Freiheitsgrade	F-Wert	P-Wert
Zeit	2	2,19	0,1406
Düngung	1	1,77	0,1997
Zeit*Düngung	2	1,19	0,3262
Variante	4	11,65	< 0,0001
Zeit*Variante	8	0,46	0,8677
Düngung*Variante	4	0,90	0,4850
Zeit*Düngung*Variante	8	0,70	0,6855
Wiederholung	2	6,74	0,0065
Zeit*Wiederholung	4	1,54	0,2322

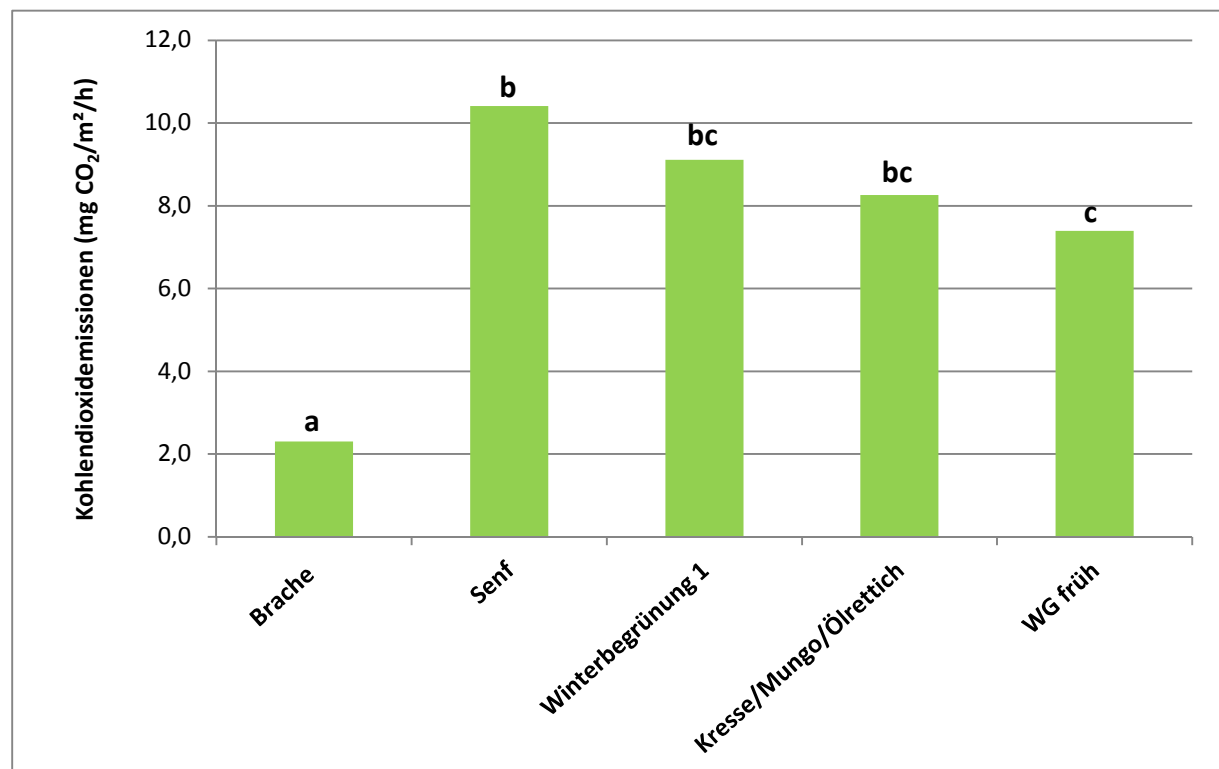


Abbildung 44 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf die Kohlendioxidemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$.

In der Abbildung 44 werden die Kohlendioxidemissionen am Standort Lichtenwörth, gemittelt über den Termin und die Düngung gezeigt. Deutlich von den anderen vier Varianten unterscheidet sich die Variante Brache. Die anderen drei Varianten (Senf, Winterbegrünung 1, Kresse/Mungo/Ölrettich) unterscheiden sich statistisch nicht voneinander. Somit ist zwischen der Variante Schwarzbrache und den begrünten ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Kohlendioxidemissionen feststellbar.

Die Schwarzbrache (Abbildung 45) zeigt bei den vier Messterminen gegenüber den anderen Varianten sehr geringe, teilweise sogar die geringsten Kohlendioxidemissionen. Die niedrigen Emissionen des Kohlendioxides bei der Schwarzbrache weisen auf den nicht vorhandenen Pflanzenbestand hin, wodurch es in der Folge auch nicht zu einem Rotteprozess und der damit einhergehenden Kohlendioxidbildung kommt. Die Verluste an Kohlenstoff in Form des Kohlendioxides bei der Schwarzbrache sind allerdings als Nettoverluste zu sehen. Bei den begrünten Varianten wird durch die Photosynthese CO_2 aus der Luft aufgenommen, über die Pflanzenrückstände dem Boden zugeführt und in unterschiedlichen Zeiträumen wieder freigesetzt. Ein Teil emittiert rasch bei der Zersetzung der leicht umsetzbaren Bestandteile in Form des Kohlendioxides, der andere Teil wird der Humusbildung zugeführt und nur langsam mineralisiert. Bei der Schwarzbrache sind die Emissionen einem Verlust an organischem Kohlenstoff zuzurechnen, der in der Bilanz nicht durch Pflanzenreste der Zwischenfrucht ersetzt wird.

Wenn man sich den Effekt der Düngung am Standort Lichtenwörth statistisch ansieht, so kann hier nicht gesagt werden, dass eine Düngung höhere Kohlendioxidemissionen bedingt. Jedoch ist an diesem Standort die Variante Wassergüte früh gedüngt und ungedüngt statistisch betrachtet jene mit den geringsten CO_2 -Emissionen innerhalb der begrünten Varianten. Der Senf in Reinsaat hat statistisch gesehen die höchsten Kohlendioxidemissionen.

Die höheren Emissionen bei den begrünten Varianten im Gegensatz zur Variante Schwarzbrache sind auf den Pflanzenbestand und der damit verbundenen höheren Aktivität der Bodenlebewesen zurückzuführen, die durch die Zufuhr von organischer Substanz begünstigt wird. Des Weiteren können bei noch grünen Pflanzen höhere Emissionen aufgrund der Wurzelatmung festgestellt werden.

Um Aussagen über die Höhe der Kohlendioxidemissionen treffen zu können, werden die gemessenen Werte im Mittel vom Standort Lichtenwörth mit den mittleren Emissionen zu einem späteren Zeitpunkt verglichen.

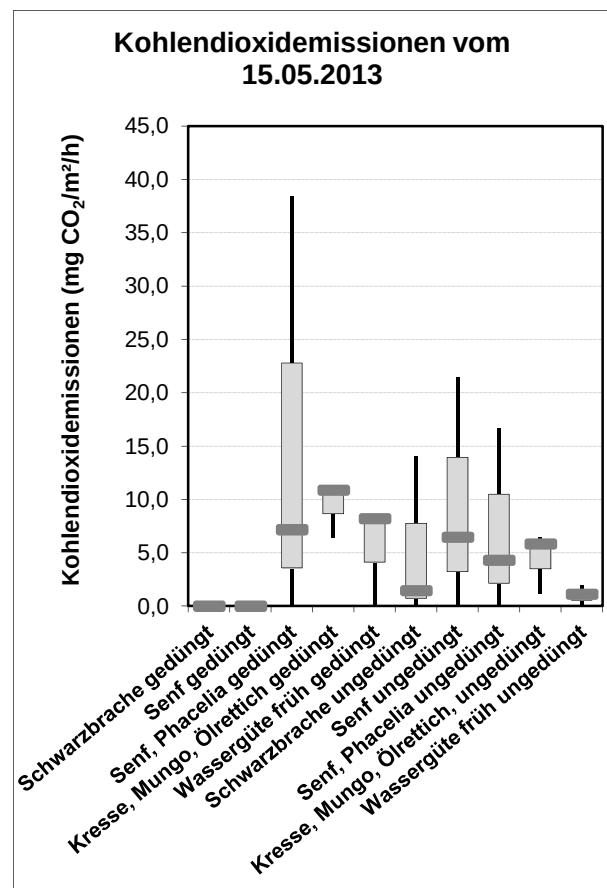
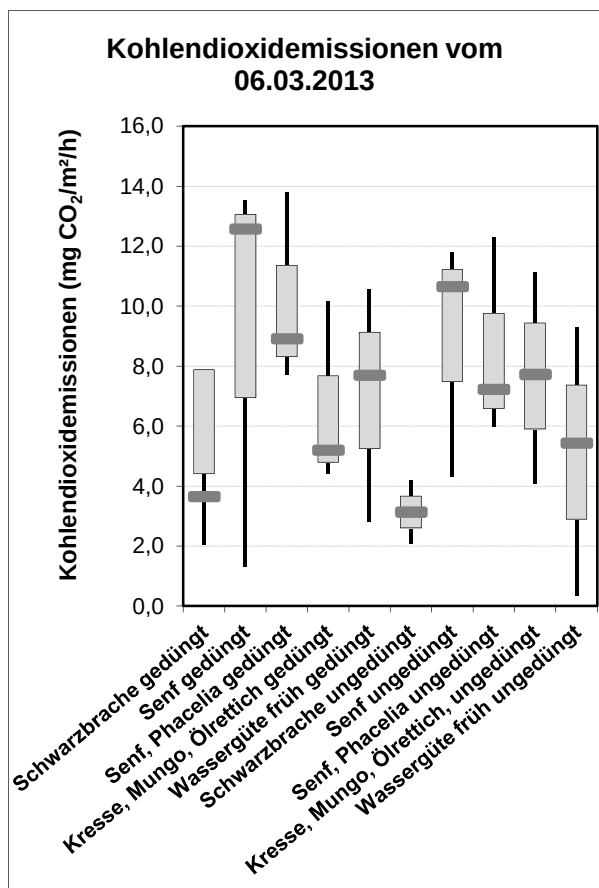
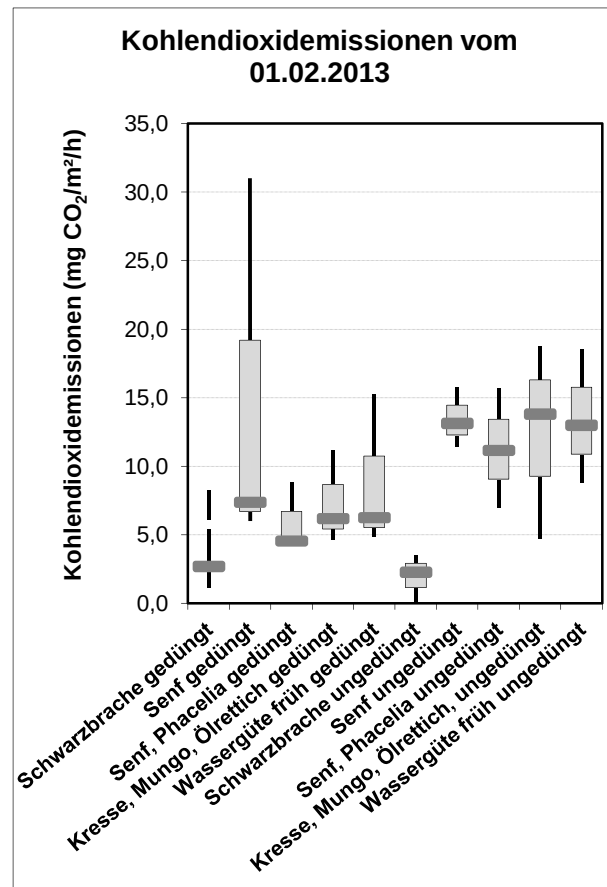
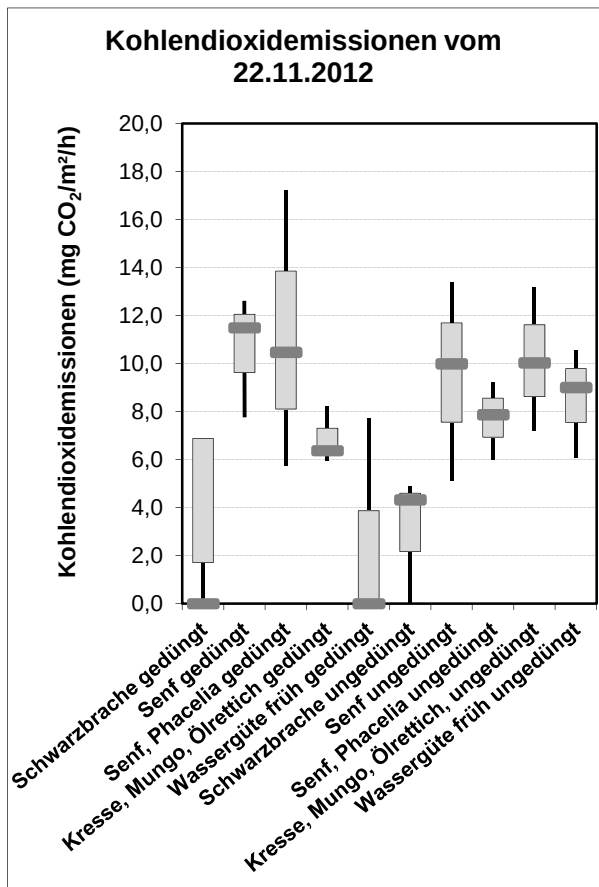


Abbildung 45 Kohlendioxidemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Lichtenwörth)

5.4.6. Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit am Standort Lichtenwörth

Um die Lachgasemissionen interpretieren zu können, wurden jeweils wieder die Bodentemperatur und der Bodenwassergehalt gemessen, da sie die Haupteinflussfaktoren für die Entstehung des Lachgases sind. Allerdings wirken sich auch der $N_{\min}$ - und der DOC-Gehalt auf die Lachgasentwicklung aus, die ebenfalls erhoben wurden.

Die Bodentemperaturen (Abbildung 46) zeigen im Mittel bei den unterschiedlichen Messungen stark abweichende Werte. So hat die erste Messung, wenn man den Mittelwert über alle Messpunkte betrachtet, mit 9,7°C einen bereits geringen Wert, obwohl dieser Termin noch im Spätherbst stattfand. Mit 7,1°C zeigt die Messung vom 1. Februar die geringste Bodentemperatur auf. Danach kann man ein Ansteigen der Bodentemperaturen von 13,4°C auf 21,7°C bei der letzten Messung Mitte Mai feststellen.

Die Bodenwassergehalte (Abbildung 47) waren am 1. Februar in Lichtenwörth mit 28,7 Vol.% am höchsten. Diese Messung und jene vom 6. März mit 26,3 Vol.% wurden unmittelbar nach der Schneeschmelze durchgeführt. Dieser Wassergehalt ist für diesen Bodentyp, der eine schlechte Wasserspeicherkraft und eine hohe Durchlässigkeit besitzt, sehr hoch. Im Herbst war der Boden mit 24,5 Vol.% feuchter, als im Mai mit 21,1 Vol.%.

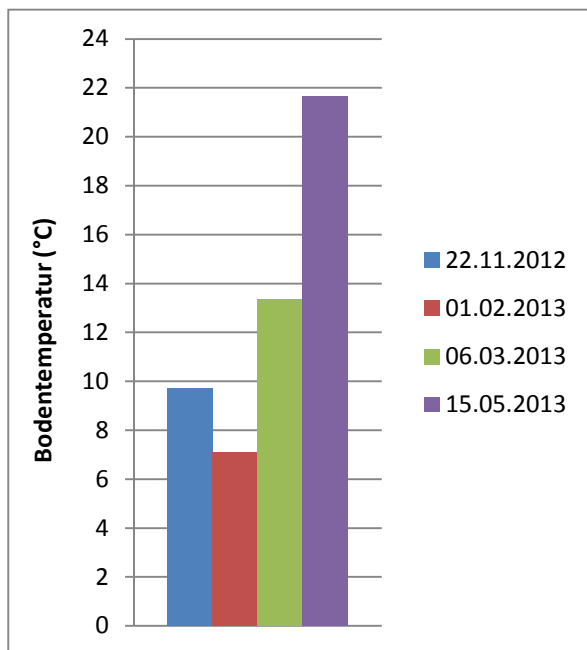


Abbildung 46 Mittelwert Bodentemperatur

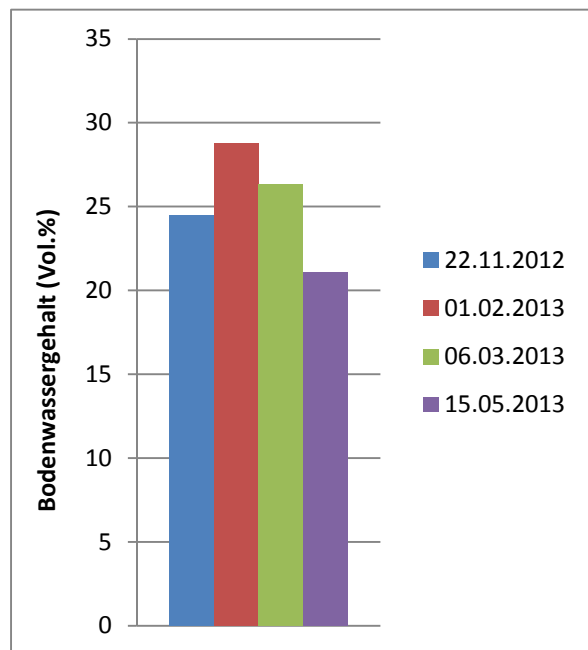


Abbildung 47 Mittelwert Bodenwassergehalt

5.4.7. Einfluss der Varianten auf die Emissionshöhe

Um Unterschiede im Emissionspotential der unterschiedlichen Varianten und Managementoptionen darzustellen, wurde eine „Joint-Regressionsanalyse“ durchgeführt. Die folgende Grafik (Abbildung 48) zeigt den Einfluss unterschiedlicher Begrünungsvarianten auf gasförmige Verluste bei ansteigendem Emissionspotential. Wie auch bereits bei der Beschreibung der einzelnen Standorte zeigt sich noch einmal, dass eine Düngungsmaßnahme die gasförmigen Verluste hinsichtlich des Stickstoffes tendenziell erhöhte.

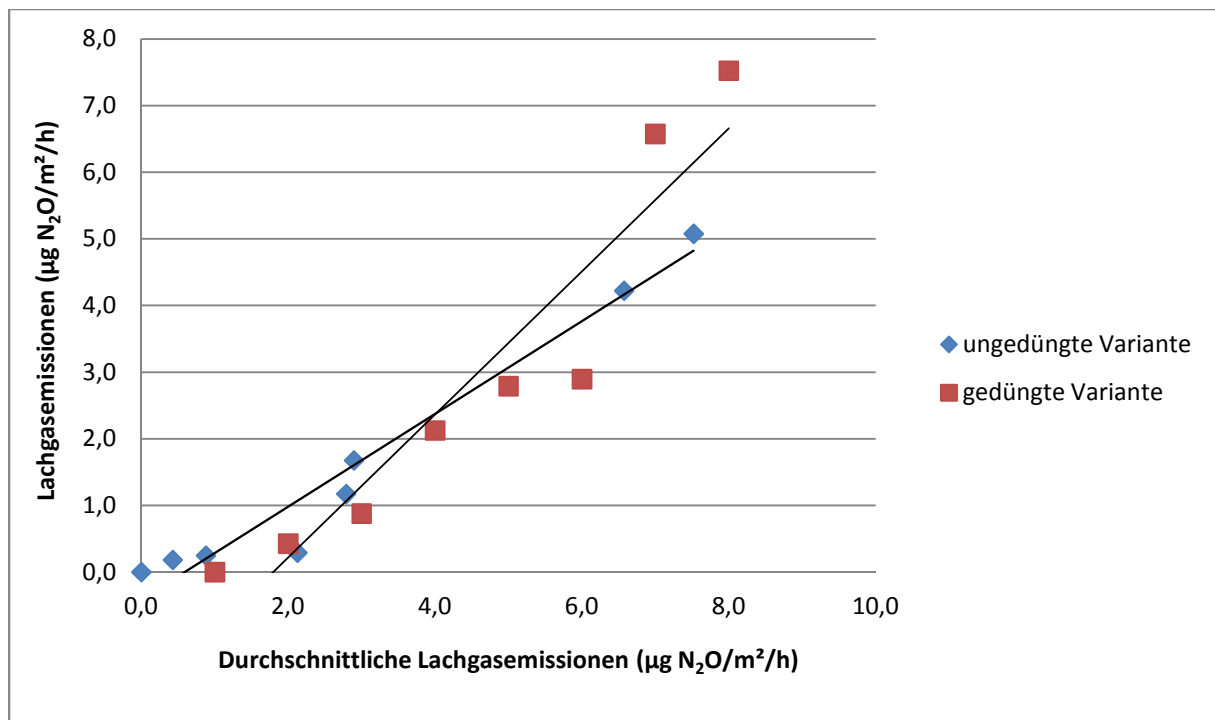


Abbildung 48 Einfluss der Düngung auf die Lachgasemissionen

Ebenfalls ist im Vergleich der Begrünungsvarianten (Abbildung 49) zu erkennen, dass die Versuchsvariante Senf in Reinsaat bei hohem Emissionspotential (Wassersättigung, etc.) deutlich erhöhte Lachgasemissionen aufweist. Alle anderen Mischungen zeigen nur geringe Abweichungen voneinander. Die hohen gasförmigen Verluste bei Senf lassen sich wie bereits vorher erwähnt durch den Abbau der Glucosinolate erklären. Hierbei werden beim Abbau der oberirdischen Biomasse Sinigrin, Allylisothiocyanat und ein Sulfat-Anion gebildet. In

weiterer Folge wird Schwefelwasserstoff gebildet, welcher das Redoxpotential im Boden herabsetzt und anaerobe Bedingungen schafft und somit die Lachgasbildung fördert. Auch die C/N-Gehalte der oberirdischen Biomasse waren bei Senf am geringsten und dies bedingt einen raschen Abbau mit einer Förderung der Lachgasbildung.

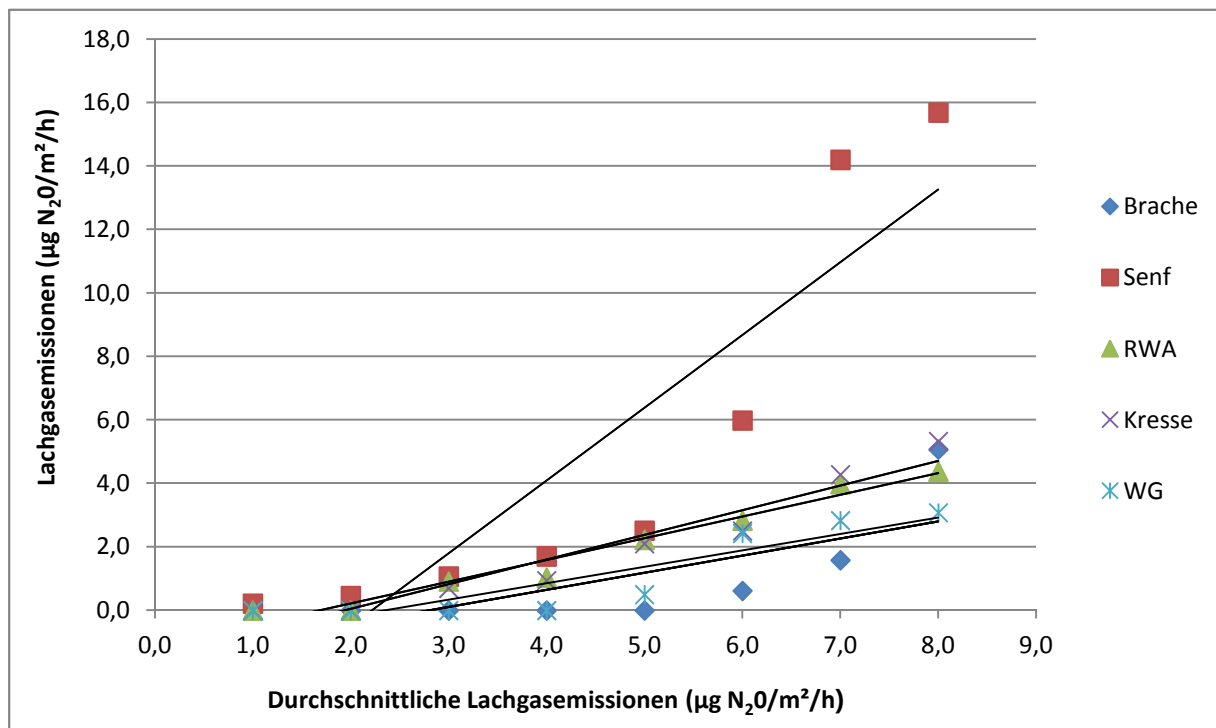


Abbildung 49 Einfluss der Varianten auf die Lachgasemissionen

Eine Stickstoffdüngung förderte die Kohlendioxidemissionen, was aufgrund einer höheren Trockenmassebildung und der vermeintlich besseren mikrobiellen Aktivität allerdings nicht überraschend ist (Abbildung 50).

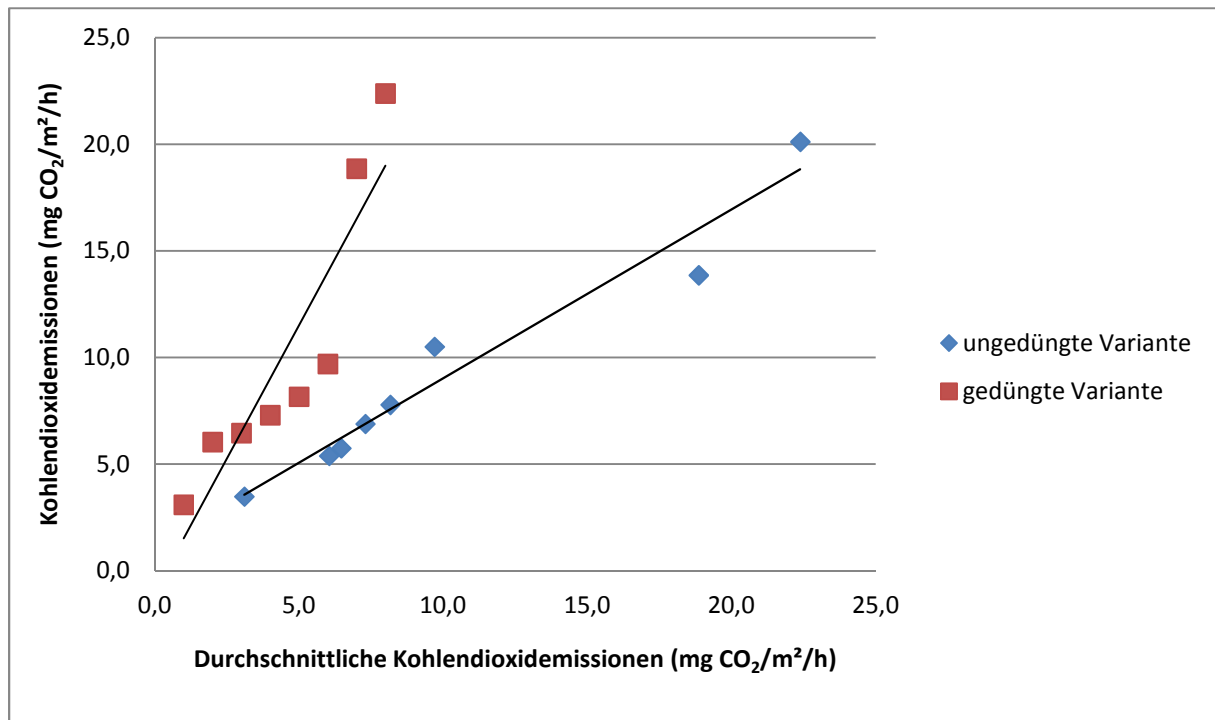


Abbildung 50 Einfluss der Düngung auf die Kohlendioxidemissionen

Betrachtet man nun die unterschiedlichen Varianten im Vergleich zur Kontrollvariante Schwarzbrache in der Abbildung 51, so kann man in der Regressionsanalyse erkennen, dass die Emissionen unabhängig von der Emissionshöhe sind. Bei den begrünten Flächen verlaufen die Linien annähernd parallel und nur die Variante Schwarzbrache zeigt unabhängig vom Emissionspotential etwas niedrigere Emissionen. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss hier wieder darauf hingewiesen werden, dass bei den begrünten Flächen im Zuge des Wachstums Kohlenstoff gebunden wurde und so auch höhere Abgaben an die Atmosphäre auftreten. Im Gegensatz dazu sind die Emissionen bei der Schwarzbrache als Nettoverluste anzusehen und für die Humusbilanz kritisch zu bewerten. Bei den Kohlendioxidemissionen konnten im Gegensatz zu den Lachgasemissionen keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den Versuchsvarianten und Managementoptionen festgestellt werden.

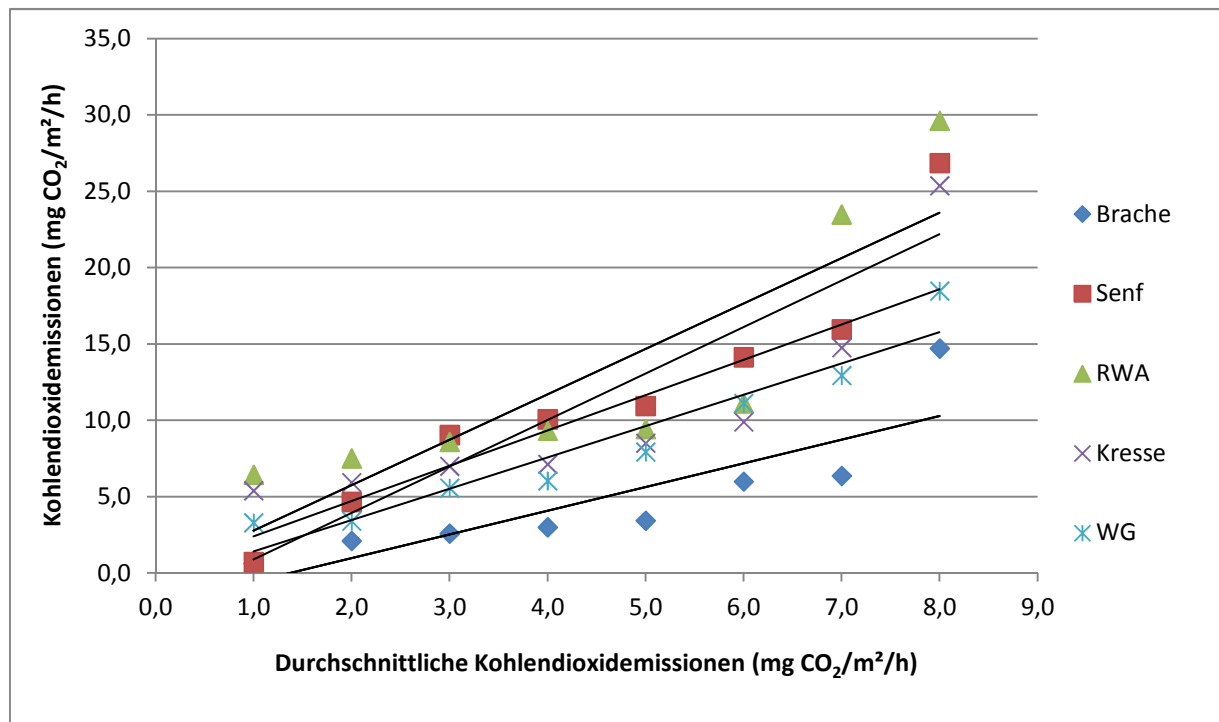


Abbildung 51 Einfluss der Varianten auf die Kohlendioxidemissionen

5.4.8. Einfluss des DOCs und des mineralisierten Stickstoffes auf gasförmige Emissionen

Im Folgenden soll noch genauer auf Ursachen für die Emissionshöhe eingegangen werden. So können die Voraussetzungen für hohe gasförmige Emissionen noch genauer interpretiert werden. Zwei Variablen, die mit der Entstehung von gasförmigen Emissionen im Zusammenhang stehen, sind der mineralisierte Stickstoff im Boden als Elektronenakzeptor für Lachgas und die lösliche Fraktion des Kohlenstoffes. Eine Messgröße dafür ist der Wert des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC, dissolved organic carbon). Beide Messparameter wurden erhoben und sind in den folgenden Grafiken (Abbildung 52 u. 53) dargestellt.

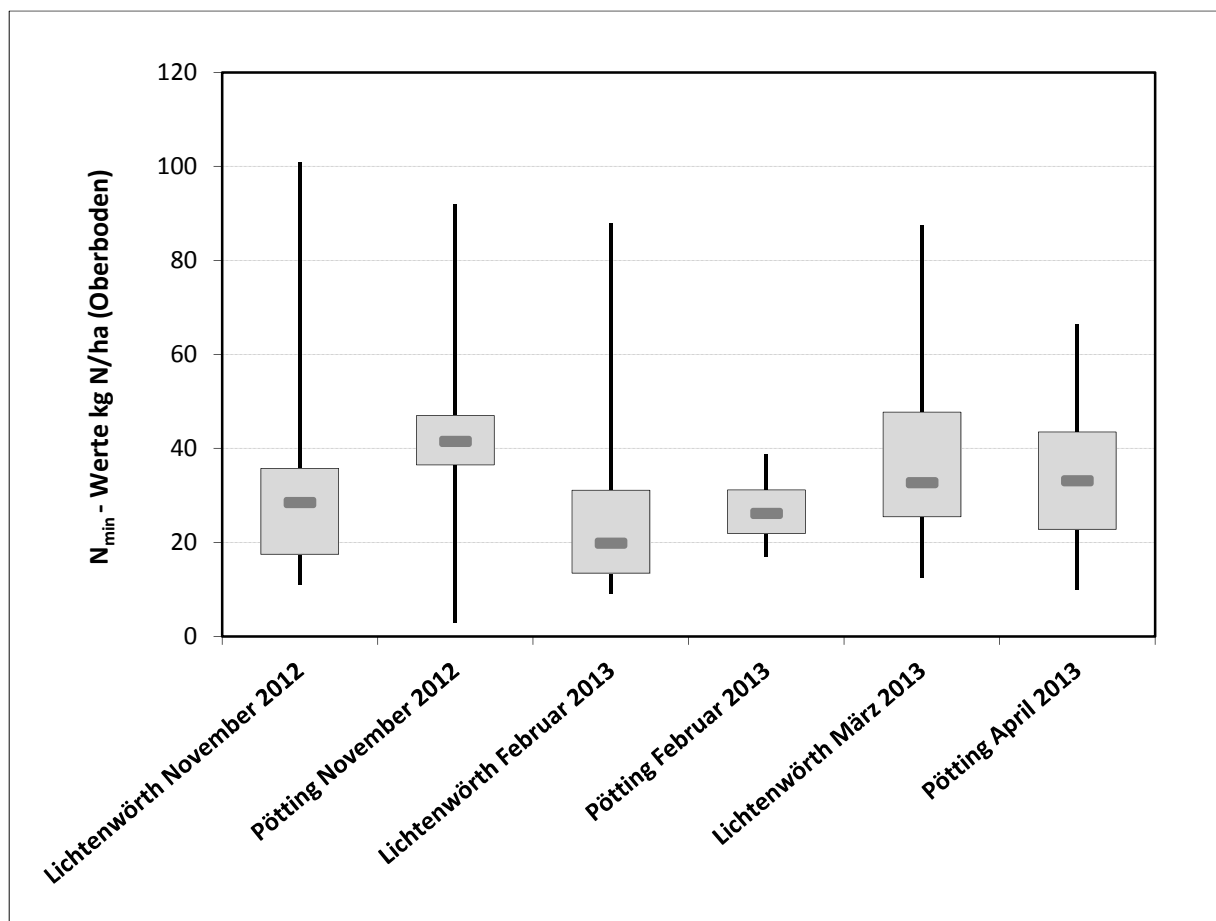


Abbildung 52 Vergleich der $N_{\min}$ -Werte zu den drei Gasmessterminen

Die $N_{\min}$ -Gehalte auf den beiden Standorten unterschieden sich im Wesentlichen nur bei der Messung im Herbst. Hier konnten Abweichungen von bis zu 37 % festgestellt werden. Bei den anderen Messterminen konnte keine deutliche Abweichung mehr festgestellt werden. Die höheren $N_{\min}$ -Werte im Herbst am Standort Pötting (104 kg/ha im Vergleich zu 85 kg/ha) lassen sich sicherlich durch die deutlich höheren $N_{\min}$ -Werte schon vor der Anlage der Zwischenfruchtbeegrünung erklären.

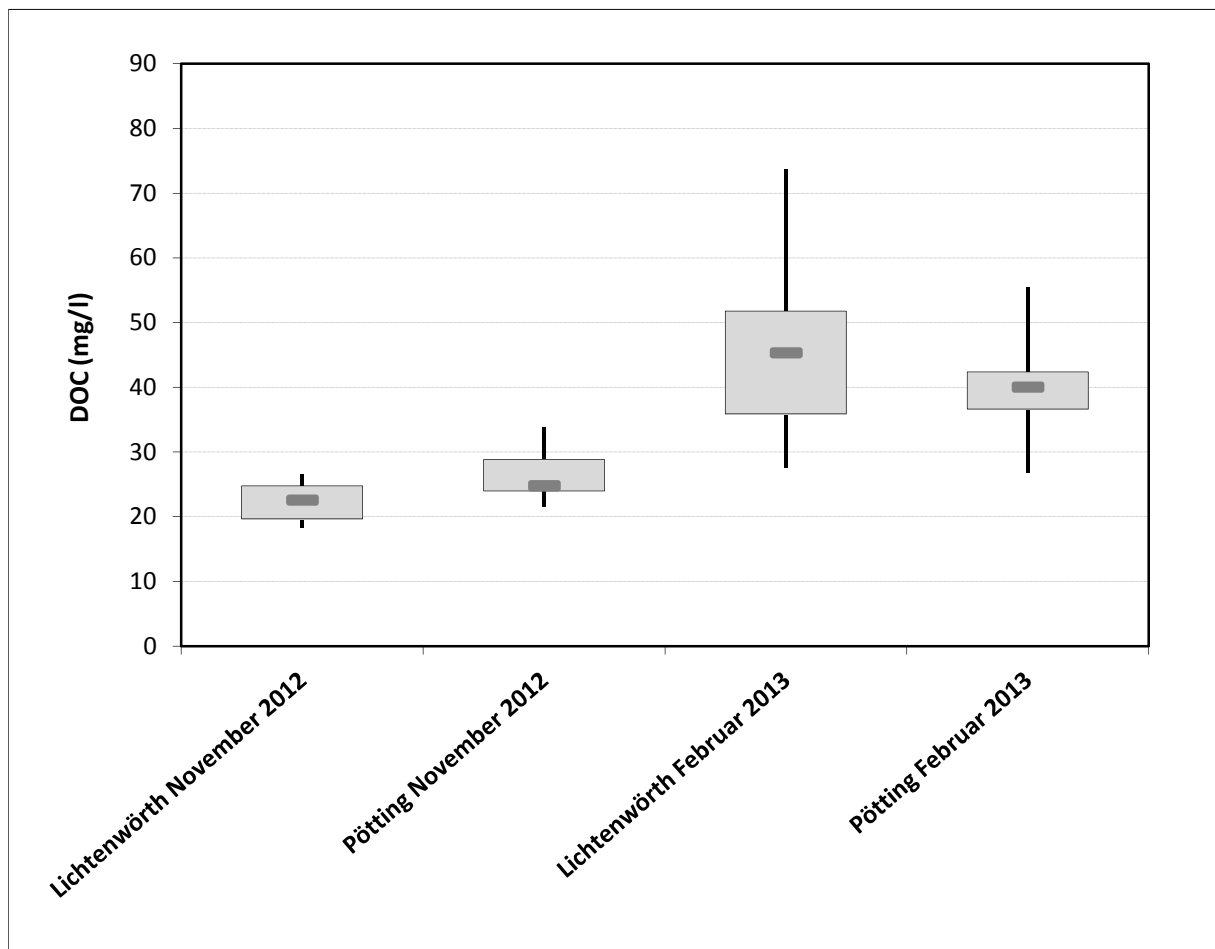


Abbildung 53 Vergleich des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC) zur Herbst- und Frühjahrsbeprobung.

Der Gehalt an gelöstem organischem Kohlenstoff wurde im Herbst in Form einer Mischprobe je Variante erhoben. Im Frühjahr wurden schließlich jene Proben analysiert, wo erhöhte Gasemissionen festgestellt wurden. Die höchsten DOC-Gehalte konnten bei den Beprobungen im Frühjahr festgestellt werden, was sich durch den Beginn der Mineralisierung erklären lässt.

5.4.9. Ursachen für die Entstehung von bodenbürtigen Treibhausgasemissionen

Bei den verschiedenen Messterminen der Treibhausgase wurden ausgewählte Pflanzen- und Umweltvariablen untersucht. Ziel dieser Untersuchung bzw. Messung war es, entscheidende Variablen, die den bodenbürtigen Emissionen auf Feldern mit Zwischenfruchtbeständen zugrunde liegen, zu finden. Bei einigen Variablen konnten allerdings nur ausgewählte Stichproben (z.B. DOC) gemessen werden.

In den nächsten beiden Graphiken (Abb. 54 und 55) wird eine Regression zwischen dem Lachgasfluss und dem Bodenwassergehalt sowie der DOC-Konzentration (Abb. 56 und 57) gezeigt. Sowohl im Feuchtgebiet, als auch im Trockengebiet konnte ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen den beiden Variablen (Bodenwassergehalt und DOC-Konzentration) festgestellt werden. So konnte wie schon vermutet, der Zusammenhang zwischen einem hohen Bodenwassergehalt und der damit einhergehenden Erhöhung des Emissionspotenziales bestätigt werden. Am Standort Lichtenwörth kann der Bodenwassergehalt im Zusammenhang mit dem Lachgasfluss als lineare Gleichung beschrieben werden. In Oberösterreich am Standort Pötting ist hingegen ein starker exponentieller Zusammenhang zwischen den beiden Variablen (Bodenwassergehalt und DOC-Konzentration) mit einem starken Anstieg der Lachgasemissionen bei einem Bodenwassergehalt von mehr als 40 Vol.% (> 80 % der Poren sind mit Wasser gefüllt) festzustellen.

Das Verhältnis zwischen der DOC-Konzentration und den Lachgasemissionen ist im Feucht- und Trockengebiet signifikant, obwohl in Pötting ein geringes Bestimmtheitsmaß (r^2) vorliegt. Interessant ist, dass vor allem die Steigung der Regressionsgeraden nicht nur im Feuchtgebiet, sondern auch im Trockengebiet sehr ähnlich ist. Das weist auf einen konsistenten Zusammenhang zwischen den beiden Parametern hin.

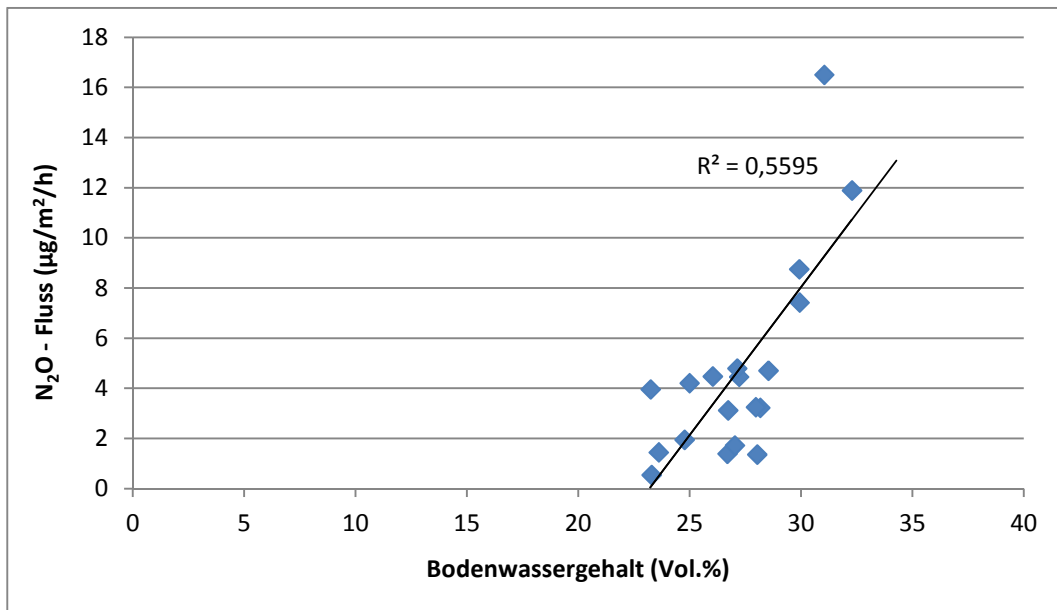


Abbildung 54 Regression zwischen dem Bodenwassergehalt und dem N_2O -Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth)

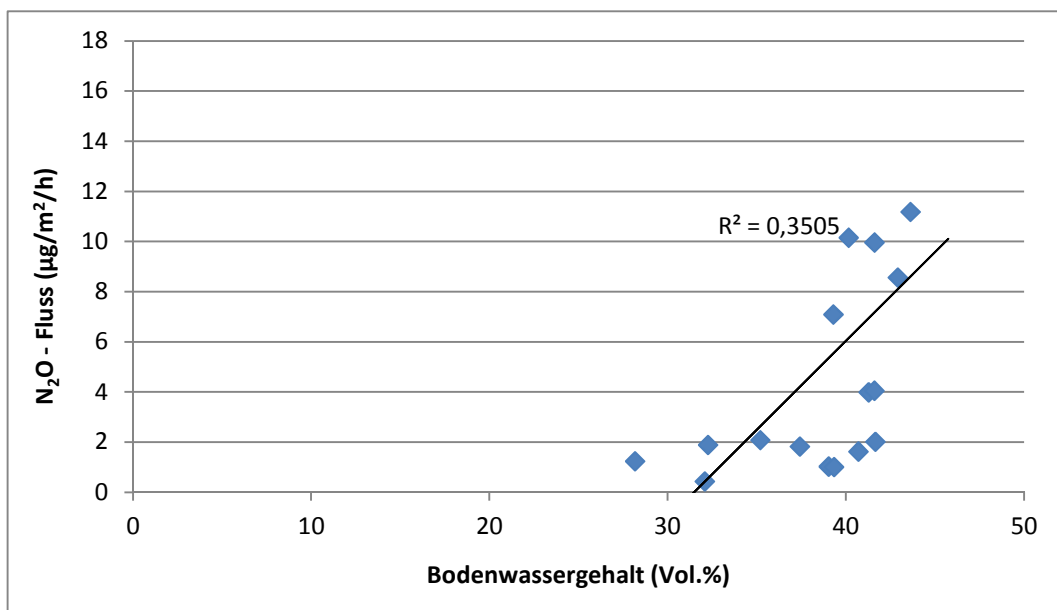


Abbildung 55 Regression zwischen dem Bodenwassergehalt und dem N_2O -Fluss im Feuchtgebiet (Pötting)

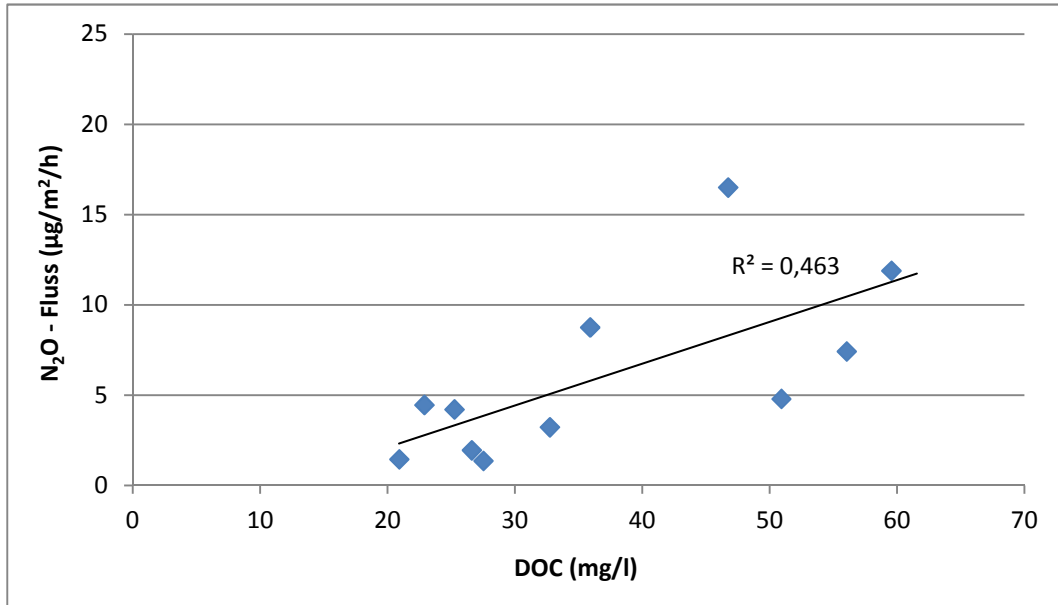


Abbildung 56 Regression zwischen dem DOC und dem N₂O-Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth)

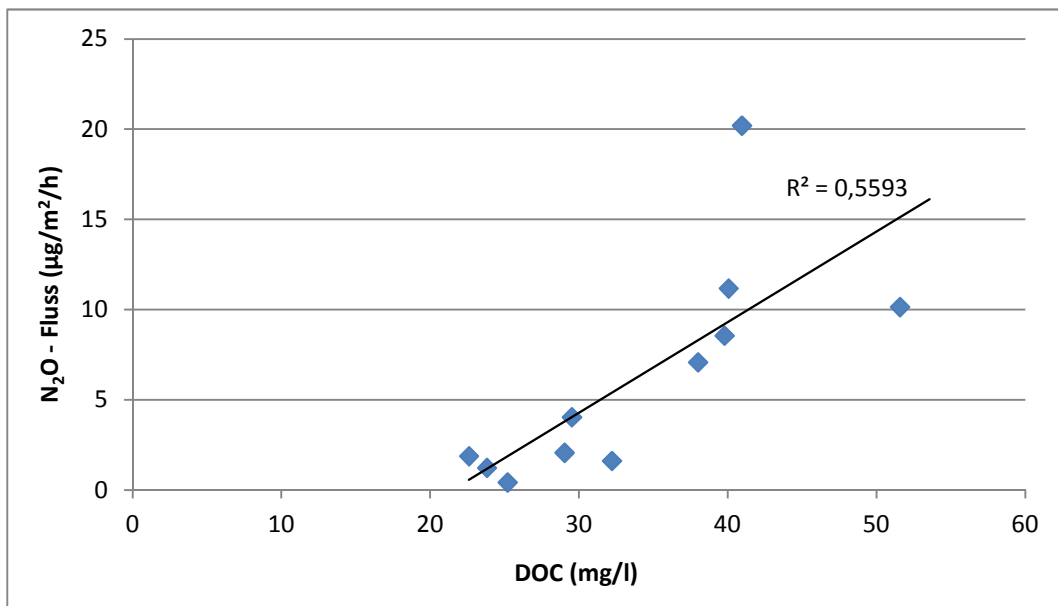


Abbildung 57 Regression zwischen dem DOC und dem N₂O-Fluss im Feuchtgebiet (Pötting)

Im Trockengebiet wurden bei den Kohlendioxidemissionen (Abb. 58 und 59) signifikante Zusammenhänge mit den Umweltvariablen Bodenwassergehalt, Bodentemperatur, DOC-Konzentration und teilweise auch beim N-Gehalt in der Biomasse festgestellt. Im Feuchtgebiet konnte dies nicht beobachtet werden. Das Bestimmtheitsmaß (r^2) war an beiden Standorten gering. Es deutet darauf hin, dass andere Indikatoren, wie etwa die

Mikroorganismenaktivität im Boden, für die Vorhersage der Kohlendioxidemissionen betrachtet werden müssten. Der DOC-Gehalt ist ein wichtiger Faktor, den es bei weiteren Untersuchungen zu beachten gilt. Denn sowohl im Feuchtgebiet, als auch im Trockengebiet scheint es einen guten Indikator für den Einfluss von Zwischenfrüchten auf die Treibhausgasemissionen zu geben.

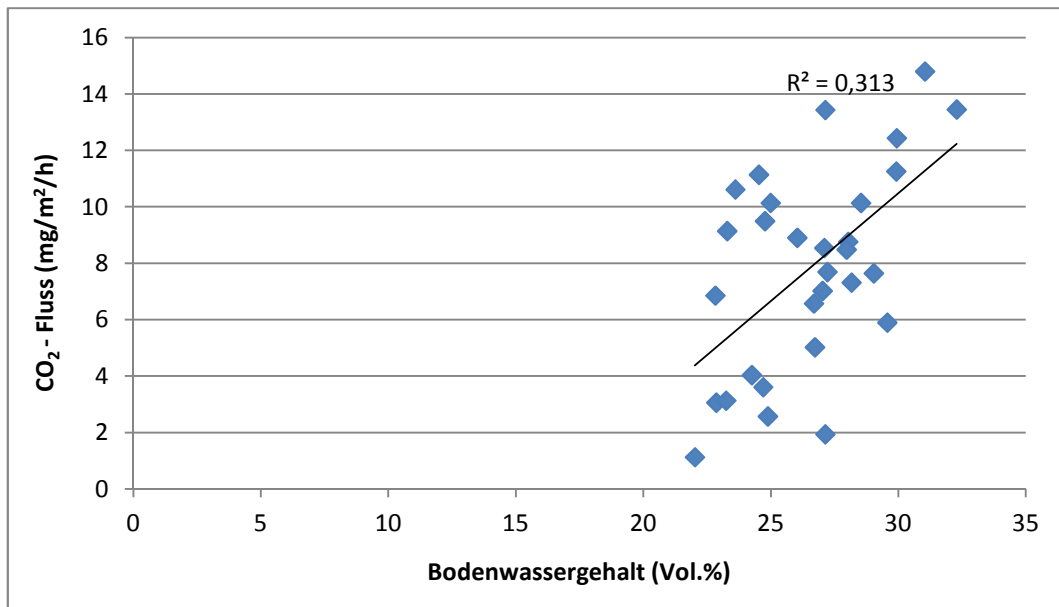


Abbildung 58 Regression zwischen dem DOC und dem CO_2 -Fluss in Trockengebiet (Lichtenwörth)

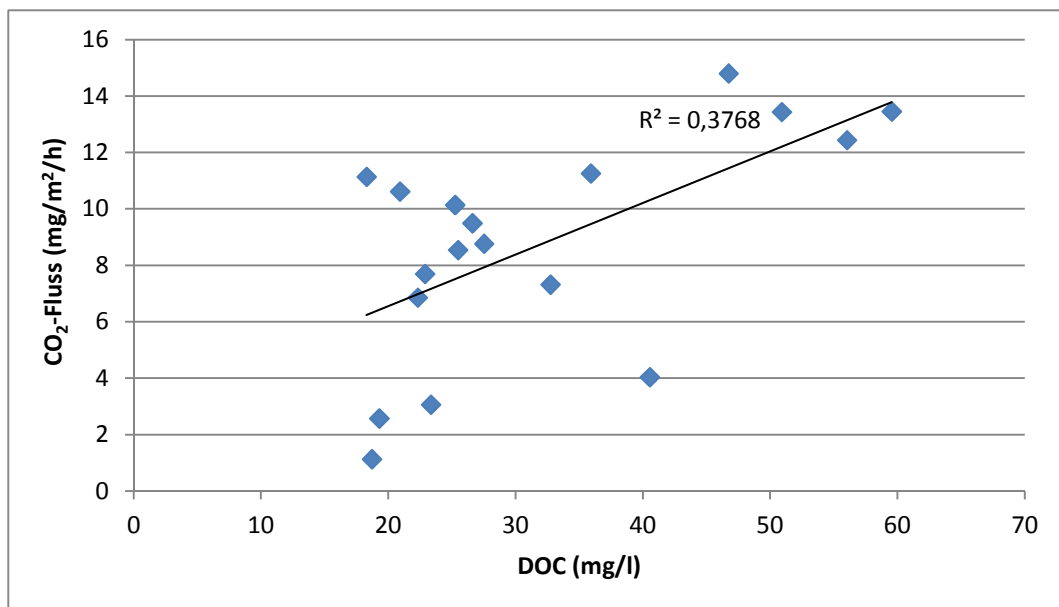


Abbildung 59 Regression zwischen dem DOC und dem CO_2 -Fluss in Trockengebiet (Lichtenwörth)

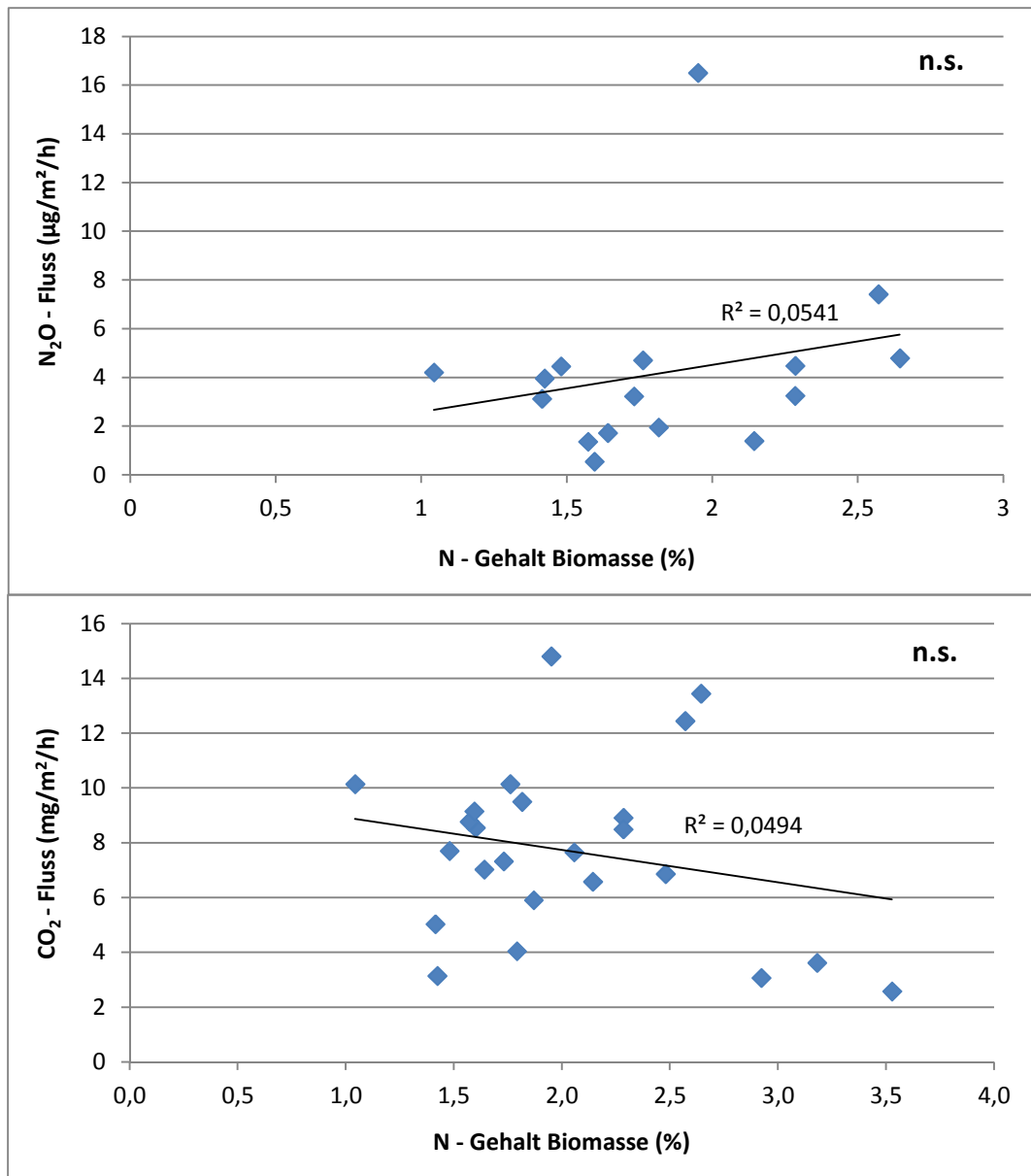


Abbildung 60 Regression zwischen dem N-Gehalt der Biomasse und dem CO₂- und N₂O-Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth)

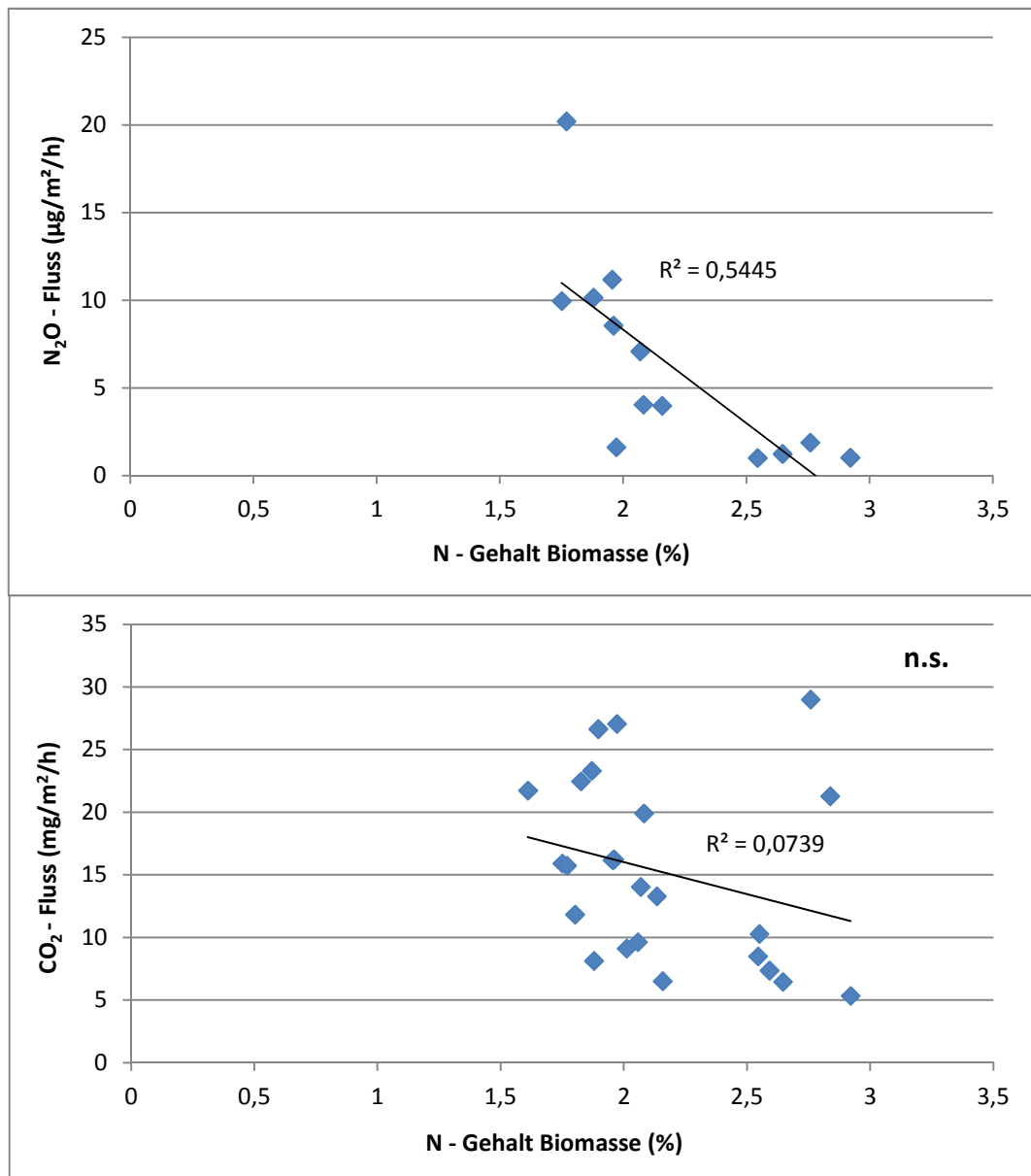


Abbildung 61 Regression zwischen dem N-Gehalt der Biomasse und dem CO₂- und N₂O-Fluss im Feuchtgebiet (Pötting)

6. Schlussfolgerungen

Abschließend lassen sich alle Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit noch kurz zusammenfassen und die Forschungsfragen beantworten.

Welche Unterschiede zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten sind im Hinblick auf die untersuchten Parameter oberirdische Trockenmasse, Stickstoffgehalt in Prozent in der oberirdischen Trockenmasse, C/N-Verhältnis und N_{min} im Boden feststellbar?

- Auf allen drei Versuchsstandorten in Oberösterreich ist der Effekt eines späteren Saattermines deutlich zu sehen. So konnte bei Senf in Reinsaat deutlich weniger Biomasse gebildet werden. Die Unterschiede belaufen sich hier zum Schnitt der anderen Varianten auf über zwei Tonnen Trockenmasse je Hektar in Ort im Innkreis und auf rund eine Tonne auf den anderen beiden Standorten in Pötting und Bad Wimsbach-Neydharting. Die spätere Saat um rund 2 Wochen macht deutlich, welches Wachstumspotenzial Anfang August noch gegeben sein kann und welches Potenzial bei späterer Saat verschenkt wird. Es macht also Sinn, sofern die Ernte der Vorkultur es zulässt, relativ früh die Begrünung zu säen, um das Wachstumspotenzial voll ausschöpfen zu können. Wird zum Beispiel Wintergerste Anfang bis Mitte Juli geerntet und bleibt der Boden dann mehrere Wochen brach liegen und wird erst Mitte August eine Begrünung gesät, so ist bereits wertvolle Zeit für eine optimale Begrünungsentwicklung verloren gegangen. Natürlich soll eine frühere Saat nicht auf Kosten einer optimalen Stroheinarbeitung und Strohrotte sowie einer mechanischen Unkrautbekämpfung gehen. Hier muss betriebs- und jahresspezifisch entschieden werden, welche Maßnahmen durchgeführt werden und wie schnell eine Begrünung gesät werden kann.
- Ein genereller Trend, ob eine Mischung auf den drei Versuchsstandorten in Oberösterreich zu bevorzugen ist, lässt sich bei den Ergebnissen der Trockenmassebildung nicht ableiten. So erbrachte die Mischung aus Kresse/Mungo/Ölrettich am Standort Ort im Innkreis und in Bad Wimsbach-

Neydharting sehr gute Biomasseaufwüchse. In Bad Wimsbach-Neydharting lag sie sowohl in der gedüngten als auch in der ungedüngten Parzelle an vorderster Stelle mit der Trockenmassebildung. Am Standort Pötting und auch in Ort im Innkreis zeigte sich die Mischung Wassergüte früh als eine Mischung mit einem hohen Wachstumspotenzial. Durch die Zusammensetzung dieser Fertigmischung ist es möglich, bei einer rechtzeitigen Saat um Anfang August eine gute Massenentwicklung zu erreichen und im Frühjahr eine gut zu bearbeitende Mulchschicht zu haben.

Die Variante Senf in Reinsaat hat auf beiden Versuchsstandorten im Trockengebiet die zweithöchsten Trockenmassegewichte erreicht, was die Eignung des Sareptasenfes für einen hohen Biomasseaufwuchs bei früher Saat zeigt. Kreuzblütler sind in Zwischenfruchtmischungen für die Bestandesbildung wichtig, denn vor allem bei einem späteren Saattermin erbringen sie noch einen guten Aufwuchs.

Abschließend lässt sich aus den Ergebnissen sagen, dass die Saatzeit das wichtigste Kriterium für einen hohen Biomasseaufwuchs ist. Nachrangig ist somit der Effekt der unterschiedlichen Begrünungsvarianten. Die Mischung Wassergüte früh ist für das Feuchtgebiet als Mischung ohne Kreuzblütler sehr gut geeignet. Im Trockengebiet erbrachten die Mischungen mit Kreuzblütlern bessere Ergebnisse.

- Bei den prozentuellen Stickstoffgehalten hat Senf im Feuchtgebiet auf den Standorten Ort im Innkreis mit 3,3 % und Pötting mit 2,7 % die höchsten Gehalte. Am Standort Bad Wimsbach-Neydharting ergibt sich ein etwas anderes Bild. Hier ist die Mischung Wassergüte früh mit 2,6 % an erster Stelle. Die prozentuellen Abweichungen der einzelnen Varianten mit Ausnahme von Senf sind nur sehr gering und liegen im Bereich von maximal 0,5 %. Die Abweichungen zu Senf auf den Standorten Ort im Innkreis und Pötting liegen bei rund 1 %. Dieser hohe Stickstoffgehalt von Senf in Reinsaat lässt sich durch den späteren Saattermin und die daraus resultierende geringere Verholzung erklären. Allerdings ist dieser Einfluss deutlich geringer als der Einfluss des Trockenmasseaufwuchses je Hektar. Dadurch sind die Varianten mit Senf - obwohl diese einen hohen prozentuellen Stickstoffgehalt aufweisen - in der Regel bei den aufgenommenen Stickstoffmengen

nicht an erste Stelle zu setzen. Die Mischung Wassergüte früh überzeugt auf zwei von drei Standorten sowohl in der gedüngten als auch in der ungedüngten Variante.

Die prozentuellen Stickstoffgehalte in der oberirdischen Pflanzenmasse schwanken im Trockengebiet zwischen 1,6 und 3,9 %. Am Standort Lichtenwörth hat der Senf in Reinsaat den höchsten prozentuellen Stickstoffgehalt mit 2,9 %. Die anderen Varianten bewegen sich alle ungefähr zwischen 1,6 und 1,8 %. In Wulkaprodersdorf zeigen die Varianten Senf in Reinsaat und die Mischung Kresse/Mungo/Ölrettich die höchsten Werte mit ca. 3,7 und 3,9 % auf. Im Mittel liegen die Stickstoffgehalte der vier Varianten in Wulkaprodersdorf um 1,5 % höher als in Lichtenwörth, was auf die um ca. drei Wochen später erfolgte Aussaat der Zwischenfrüchte zurück geführt werden kann. Denn ein älterer Pflanzenbestand setzt sich aus einem höheren Anteil an Lignin zusammen. Das heißt, die Verholzung der Pflanze ist schon weiter fortgeschritten als bei jungen. Dadurch erhöht sich auch der Kohlenstoffgehalt in der Pflanze, wodurch wiederum der Stickstoffgehalt in der Pflanze sinkt.

Hinsichtlich des Faktors C/N-Verhältnis lässt sich für alle drei Standorte in Oberösterreich zusammenfassend sagen, dass Senf auf zwei von drei Standorten das geringste C/N-Verhältnis aufweist. Das enge C/N-Verhältnis lässt sich durch den späteren Saattermin erklären. Denn ein späterer Saattermin führt auch zu jüngeren Pflanzenbeständen. Nur der Standort Bad Wimsbach-Neydharting zeigt ein anderes Bild, wobei hier auch die geringen Unterschiede in den einzelnen C/N-Verhältnissen beachtet werden müssen. Die Mischung Wassergüte früh zeigt auf allen 3 Standorten ein sehr enges C/N-Verhältnis.

Das C/N-Verhältnis in Wulkaprodersdorf ist aufgrund des deutlich höheren Stickstoffgehaltes der oberirdischen Biomasse bei drei von vier Varianten um mehr als das Doppelte enger als am Standort Lichtenwörth. Nur bei der Variante Senf in Reinsaat ist der Unterschied geringer (10,7:1 und 14,7:1). Die unterschiedlichen C/N-Verhältnisse auf den verschiedenen Standorten zeigen den Einfluss des Saattermines.

- Im Feuchtgebiet ist am Standort Ort im Innkreis die Vorteilhaftigkeit einer Begrünung von Ackerflächen sofort erkennbar. Die $N_{\min}$ -Werte wurden durch eine Winterbegrünung reduziert und somit bestand eine geringere Gefahr von

Auswaschungsverlusten. Dieser Begrünungseffekt ist auf den anderen beiden Standorten nicht mehr so deutlich zu erkennen. In Pötting und Bad Wimsbach – Neydharting ergeben sich in keinem Punkt signifikante Unterschiede.

Die $N_{\min}$ -Werte liegen in Lichtenwörth über jenen in Wulkaprodersdorf. Sie sind in etwa ein Drittel bis manchmal sogar mehr als die Hälfte höher als in Wulkaprodersdorf. Demnach muss der Boden in Lichtenwörth besser mit Stickstoff versorgt sein, als in Wulkaprodersdorf.

Die $N_{\min}$ -Gehalte der einzelnen ungedüngten Versuchspartzen in Lichtenwörth außer der Brache, schwanken alle zwischen 34,6 und 39,6 kg N/ha und unterscheiden sich daher statistisch nicht signifikant voneinander. Nur die Brache ist in der ungedüngten Ausführung mit einem $N_{\min}$ -Gehalt von 63,8 kg N/ha deutlich höher. Bei den gedüngten Varianten hat die Wassergüte früh mit 44,1 kg N/ha den geringsten $N_{\min}$ -Wert.

Am Standort Wulkaprodersdorf weist die Brache im Mittel aller Varianten mit 45,0 kg N/ha die höchsten $N_{\min}$ -Werte auf. Die Wassergüte früh gedüngt hat die geringsten Werte von allen gedüngten Varianten. In der ungedüngten Form ist die Wassergüte früh mit den restlichen ungedüngten Varianten mit einem $N_{\min}$ -Wert von ca. 30 kg N/ha in etwa gleich auf.

Sind signifikante Unterschiede in den Parametern oberirdische Trockenmasse und $N_{\min}$ im Boden zwischen einer gedüngten und ungedüngten Variante feststellbar?

- Der Effekt der Düngung mit 30 kg jahreswirksamen Stickstoff je Hektar auf die oberirdische Biomassebildung konnte auf allen Versuchsstandorten sowohl im Trockengebiet als auch im Feuchtgebiet statistisch nicht belegt werden. Die gute Versorgung der Böden mit Nährstoffen und Wirtschaftsdüngern bedingte, dass eine weitere Stickstoffgabe nichts bewirkte.
- Der Effekt der Düngung auf die $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens in Bezug auf die unterschiedlichen Varianten konnte nicht bei allen Varianten nachgewiesen werden.

Die Varianten Senf in Reinsaat und die Mischung Winterbegrünung 1 unterscheiden sich von der Schwarzbrache nicht. Erst die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich und Wassergüte früh zeigten signifikante Unterschiede zu den anderen Varianten. Hier zeigt sich der Effekt der Begrünung zur Reduzierung des $N_{\min}$ -Gehaltes bei diesen beiden Mischungen. Innerhalb einer Variante gab es abhängig von einer Düngemaßnahme nur bei den beiden Varianten Kresse/Mungo/Ölrettich sowie der Mischung Wassergüte früh keine Unterschiede. Die anderen Versuchsvarianten reagierten auf eine Düngung mit einem erhöhten $N_{\min}$ -Gehalt im Boden.

Welche Begrünungsvarianten zeigen die geringsten gasförmigen Stickstoffemissionen und welche Bodenparameter haben den größten Einfluss auf gasförmige Emissionen?

- Die Untersuchung der bodenbürtigen Treibhausgasemissionen (N_2O und CO_2) wurde an zwei unterschiedlichen Standorten in Österreich durchgeführt, die sich im Klima, und auch durch verschiedene Bodentypen unterschieden. Ziel dieser Messungen war es, die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten mit der Schwarzbrache innerhalb eines Standortes und zwischen den beiden Standorten (Feucht- und Trockengebiet) zu vergleichen und verschiedene boden- und pflanzenbezogene Faktoren, die Einfluss auf die Treibhausgasbildung haben, feststellen und untersuchen zu können. So kann für die Landwirtschaft in der Zukunft, die maßgeblich durch den Klimawandel beeinflusst werden wird, der Anbau von Zwischenfrüchten optimiert werden.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- Betrachtet man das Emissionspotenzial des Lachgases bei Zwischenfrüchten, so kann gesagt werden, dass der Bodenwassergehalt den größten Einfluss auf die Höhe des Lachgases hat. Die Kohlendioxidemissionen sind bei niedriger Bodentemperatur gering und steigen mit zunehmender Bodentemperatur an. Dieser Prozess, vor allem zu Beginn der Vegetation im Frühling zeigt den Start der Mineralisierung. Die Methangasemissionen sind vernachlässigbar, obwohl sie bei einigen Messungen festgestellt werden konnten.

- Die Kohlendioxidemissionen steigen durch den Anbau von Zwischenfrüchten, da die organische Substanz im Laufe des Winters und im Frühjahr verrottet und bei diesem Prozess Kohlendioxid gebildet und freigesetzt wird. Die Aktivität des Bodenlebens wird durch den Zwischenfruchtanbau stark gesteigert. Die CO₂-Emissionen bei der Schwarzbrache waren niedriger, diese Verluste müssen allerdings als Nettoverluste betrachtet werden. Die begrünten Varianten haben den Kohlenstoff in ihrer organischen Substanz gebunden und geben einen Teil durch den Prozess der Mineralisierung wieder frei.
- Die höchsten Lachgasemissionen traten bei der Variante Senf in Reinsaat auf. Dies kann mit größter Wahrscheinlichkeit auf die biochemische Zusammensetzung des Senfes zurückgeführt werden. Beim Abbau der Glucosinolate (= Senföle) entsteht Lachgas. Senf sollte daher aufgrund seiner höheren Emissionen nicht in Reinsaat, sondern ausschließlich in Mischungen Verwendung finden. Dies gilt für alle Pflanzenarten aus der Familie der Kreuzblütler.
- Der Bodenwassergehalt und der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) konnten als wichtige Einflussfaktoren für die Entstehung der Treibhausgasemissionen (N₂O, CO₂) gezeigt werden. Es konnte in der vorliegenden Untersuchung jedoch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem oberflächennahen N_{min}-Gehalt und einer Denitrifikation des Stickstoffes beobachtet werden. Geringfügige Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsvarianten sind jedoch vorhanden.

Um eine quantitative Bilanz des Einflusses der Zwischenfrüchte auf die Treibhausgasbildung erstellen zu können, müssten kontinuierliche Messungen durchgeführt werden. Des Weiteren sollten Messungen von Treibhausgasemissionen, vor allem bei Lachgas aufgrund seiner hohen Variabilität, mit einer höheren räumlichen Dichte gemacht werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass durch diesen Versuch gezeigt werden konnte, dass Zwischenfrüchte nur ein geringes Potenzial für erhöhte Treibhausgasemissionen aufweisen. Die Vorteile von Zwischenfrüchten im Hinblick auf den Erosionsschutz, Grundwasserschutz und die Belebung des Bodenlebens überwiegen bei Weitem. Demzufolge sollten auch in künftigen Agrarumweltprogrammen Zwischenfrüchte eine zentrale Rolle im

landwirtschaftlichen Ackerbau spielen. Dem geringen gasförmigen Verlust an Stickstoff, welcher durch die Verwendung von Begrünungsmischungen mit einem geringen Anteil an Kreuzblütlern noch weiter reduziert werden könnte, steht eine Fülle von positiven Aspekten gegenüber.

7. Zusammenfassung

Zwischenfruchtanbau ist eine zentrale landwirtschaftliche Maßnahme für den Boden- und Grundwasserschutz. Kritiker befürchten jedoch, dass durch den Anbau von Zwischenfrüchten erhöhte Treibhausgasemissionen (Lachgas und Kohlendioxid) entstehen. Darum wurde auf fünf Standorten in Österreich jeweils der gleiche Versuch mit fünf verschiedenen Begrünungsvarianten (Senf in Reinsaat, Winterbegrünung 1, Mischung aus Kresse, Mungo und Ölrettich, Wassergüte früh und die Kontrollvariante Schwarzbrache) angelegt. Die Gasmessungen wurden nur an zwei Standorten (OÖ und NÖ) durchgeführt, die sich klimatisch stark voneinander unterscheiden.

Die höchsten Trockenmasseerträge von bis zu 7920 kg ha^{-1} konnten am Standort Ort/I. (OÖ) gemessen werden. Der Effekt der Düngung mit $30 \text{ kg jahreswirksamen Stickstoff je Hektar}$ auf die oberirdische Biomassebildung konnte auf allen Versuchsstandorten sowohl im Trockengebiet als auch im Feuchtgebiet statistisch nicht belegt werden. Der N-Gehalt in der Pflanze war bei der Variante Senf in Reinsaat am höchsten. Der Saatzeitpunkt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Trockenmasseertrages und des N-Gehaltes. Das C/N-Verhältnis ist bei der Variante Senf in Reinsaat, aufgrund des hohen N-Gehaltes am engsten. Ein Effekt der Düngung auf die $N_{\min}$ -Gehalte des Bodens in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Varianten konnte nachgewiesen werden. Die Varianten Senf in Reinsaat und die Mischung Winterbegrünung 1 unterschieden sich von der Schwarzbrache nicht, die Mischungen Kresse/Mungo/Ölrettich und Wassergüte früh zeigten signifikante Unterschiede zu den anderen Varianten.

Begrünungen weisen nur ein geringes Potenzial für N_2O -Emissionen auf. Ein Anstieg wurde nur bei Senf in Reinsaat, vor allem unter Bedingungen hoher Lachgasbildung festgestellt. Auch die CO_2 -Emissionen zwischen Spätherbst und Frühjahr waren durch die niedrigen Bodentemperaturen gering. Die höheren CO_2 -Emissionen der begrünten Flächen weisen auf die Förderung des Bodenlebens durch die Gründüngung hin. Während Zwischenfrüchte dem Boden jedoch organisches Material zuführen, sind die CO_2 -Emissionen einer Brachfläche als Nettoverluste anzusehen. Wichtige Umweltfaktoren für die Treibhausgasbildung sind ein hoher Wassergehalt des Bodens (Anstieg von N_2O), ein hoher Gehalt an gelöstem

organischem Kohlenstoff (Anstieg von CO₂ und N₂O) und ein hoher Stickstoffgehalt der Pflanzenbiomasse (Anstieg von CO₂ und N₂O).

Die Ergebnisse zeigen, dass Zwischenfrüchte kein wesentliches Potenzial für erhöhte Treibhausgasemissionen von Ackerflächen darstellen. Daher gilt es vor allem, ihre Bedeutung für die Umwelt und die Klimawandelanpassung (Erosion, Grundwasser,...) zu beachten. Künftige Agrarumweltprogramme sollten Mischkulturen fördern und Reinsaaten von Senf vermeiden. *Brassica*-Arten sind effiziente Zwischenfrüchte und führen, sofern sie in Mischungen angebaut werden, auch zu keinen erhöhten Lachgasemissionen.

8. Summary

Covercropping is an important agriculture method for the protection of soil erosion and groundwater. Detractors fear that intercropping produces increased greenhouse gases (N_2O and CO_2). That was the reason for carrying out a project with cover crops. On five sites in Austria the same project with five different cover crop variants (Senf in Reinsaat, Winterbegrünung 1, Mischung aus Kresse, Mungo und Ölrettich, Wassergüte früh und die Kontrollvariante Schwarzbrache) was designed. The measurement of the greenhouse gases was done on two extremely different climatic sites (OÖ und NÖ).

On the site Ort/I. (OÖ) the highest dry matter content 7920 kg ha^{-1} could be measured. On the sites in the arid- and humid area the fertilizing effect ($30 \text{ kg nitrogen/hectare}$) is not statistic significant on the dry matter content. The highest percentage plant nitrogen content was found out when testing the variant Senf. Thus the drilling date have a big influence on the dry matter content and the nitrogen content in the plant. The variant Senf has also the tightest C/N-ratio, because of the high plant nitrogen content. The fertilizing effect can also be observed by the parameter N_{min} -content by the different variants. The variants Senf and the mixture Winterbegrünung 1 didn't differ from the bare fallow. The mixtures Kresse/Mungo/Ölrettich and Wassergüte früh showed significant differences in comparison with other variants.

Cover crops have a low potential as far as N_2O -emissions are concerned. Only when examining the variant Senf an increase of the N_2O -emissions could be observed, especially under conditions with a high N_2O building potential. The CO_2 -emissions between the late autumn and the spring were lower because of the low soil temperatures. The parcels with cover crops ("green parcels") have higher CO_2 -emissions, because the plants help to activate the soil organism. Cover crops supply the soil with organic material, but the carbon loss of the bare fallow can be seen as a net less. The main environmental factors for the greenhouse gas building are high soil water content (increase of N_2O), a high content of dissolved organic carbon (increase of CO_2 and N_2O) and high plant nitrogen content (increase of CO_2 and N_2O).

Finally you can say that cover crops do not have a main influence on the production of the greenhouse gases. The advantages of the cover crops are dominating. They are particularly important for the protection of soil erosion, groundwater protection and the activity of the soil organism. Brassica species are efficient cover crops, but cover crops from the brassica species in monocultures increase higher N₂O-emissions. Thus brassica species should be cultivated in mixtures with other cover crops, as the mixtures don't produce higher N₂O-emissions.

Future agricultural environmental programs should prefer cover crop mixtures and prevent the cultivation of mustard in cover crop monocultures.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Versuchsstandorte (vgl. WELTATLAS.INFO, 2013, s.p.) 44

Abbildung 2 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Ried/Innkreis (Versuchsstandort Ort/I) 55

Abbildung 3 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Waizenkirchen (Versuchsstandort Pötting) 55

Abbildung 4 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Kremsmünster (Versuchsstandort Bad Wimsbach-Neydharing) 56

Abbildung 5 Vergleich der Niederschlagssummen an den Messstellen im Feuchtgebiet (OÖ) 57

Abbildung 6 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Wiener Neustadt (Versuchsstandort Lichtenwörth) 65

Abbildung 7 Niederschlag und Temperatur ZAMG Messstelle Eisenstadt (Versuchsstandort Wulkaprodersdorf) 65

Abbildung 8 Vergleich der Niederschlagssummen an den Messstellen im Trockengebiet 66

Abbildung 9 Versuchsplan 70

Abbildung 10 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Ort/Innkreis. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 82

Abbildung 11 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Pötting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 83

Abbildung 12 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Bad Wimsbach-Neydharting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 85

Abbildung 13 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 86

Abbildung 14 Einfluss der Zwischenfrucht auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha in Wulkaprodersdorf. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 88

Abbildung 15 Einfluss von Variante*Düngung gemittelt über die Orte auf die oberirdische Biomasse in t Trockenmasse/ha. Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb einer Variante mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 89

Abbildung 16 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Ort/Innkreis. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 92

Abbildung 17 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Ort/Innkreis. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 93

Abbildung 18 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Pötting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 94

Abbildung 19 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Pötting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 95

Abbildung 20 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Bad Wimsbach – Neydharting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 96

Abbildung 21 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Bad Wimsbach-Neydharting. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 97

Abbildung 22 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 98

Abbildung 23 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Lichtenwörth. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 99

Abbildung 24 Einfluss der Zwischenfrucht auf den N-Gehalt der oberirdischen Biomasse in % in Wulkaprodersdorf. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 100

Abbildung 25 Einfluss der Zwischenfrucht auf das C/N-Verhältnis der Biomasse in Wulkaprodersdorf. 101

Abbildung 26 Einfluss von Ort*Düngung auf das C/N-Verhältnis der oberirdischen Biomasse. Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb eines Standortes mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Standorten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 102

Abbildung 27 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Ort/Innkreis (kg N/ha). 105

Abbildung 28 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Pötting (kg N/ha). 107

Abbildung 29 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Bad Wimsbach - Neydharting (kg N/ha). 108

Abbildung 30 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Lichtenwörth (kg N/ha). 109

Abbildung 31 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung in Wulkaprodersdorf (kg N/ha). 110

Abbildung 32 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm an den verschiedenen Standorten (kg N/ha). Die Großbuchstaben über den Säulen geben an, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen einer Variante auf den verschiedenen Orten besteht. Der Kleinbuchstabe dagegen gibt Auskunft über den statistisch signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten an einem Standort. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 112

Abbildung 33 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit der Düngung (kg N/ha). Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied innerhalb einer Variante mit oder ohne Düngung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten mit und ohne Düngung an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 114

Abbildung 34 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf den $N_{\min}$ -Gehalt in 0-60cm in Abhängigkeit des Beprobungstermines (kg N/ha). Die Großbuchstaben in den Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen der Herbst- und Frühjahrsbeprobung an. Die Kleinbuchstaben oberhalb der Säulen geben einen möglichen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten im Herbst und Frühjahr an. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 116

Abbildung 35 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf die Lachgasemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 119

Abbildung 36 Einfluss der Düngung und des Beprobungstermines auf die Lachgasemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 119

Abbildung 37 Lachgasemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Pötting) 122

Abbildung 38 Einfluss der Zwischenfrucht auf die Kohlendioxidemissionen in Abhängigkeit der Variante und des Beprobungstermines. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 124

Abbildung 39 Einfluss der Düngung auf die Kohlendioxidemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 124

Abbildung 40 Kohlendioxidemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Pötting) 127

Abbildung 41 Mittelwert Bodentemperatur 128

Abbildung 42 Mittelwert Bodenwassergehalt 128

Abbildung 43 Lachgasemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Lichtenwörth) 134

Abbildung 44 Einfluss der Zwischenfrucht im Vergleich zur Brache auf die Kohlendioxidemissionen. Varianten mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant bei $p < 0,05$. 135

Abbildung 45 Kohlendioxidemissionen zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Standort Lichtenwörth) 138

Abbildung 46 Mittelwert Bodentemperatur 139

Abbildung 47 Mittelwert Bodenwassergehalt 139

Abbildung 48 Einfluss der Düngung auf die Lachgasemissionen 140

Abbildung 49 Einfluss der Varianten auf die Lachgasemissionen 141

Abbildung 50 Einfluss der Düngung auf die Kohlendioxidemissionen 142

Abbildung 51 Einfluss der Varianten auf die Kohlendioxidemissionen 143

Abbildung 52 Vergleich der N_{min} -Werte zu den drei Gasmessterminen 144

Abbildung 53 Vergleich des gelösten organischen Kohlenstoffes (DOC) zur Herbst- und Frühjahrsbeprobung. 145

Abbildung 54 Regression zwischen dem Bodenwassergehalt und dem N_2O -Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth) 147

Abbildung 55 Regression zwischen dem Bodenwassergehalt und dem N_2O -Fluss im Feuchtgebiet (Pötting) 147

Abbildung 56 Regression zwischen dem DOC und dem N_2O -Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth) 148

Abbildung 57 Regression zwischen dem DOC und dem N_2O -Fluss im Feuchtgebiet (Pötting) 148

Abbildung 58 Regression zwischen dem DOC und dem CO_2 -Fluss in Trockengebiet (Lichtenwörth) 149

Abbildung 59 Regression zwischen dem DOC und dem CO_2 -Fluss in Trockengebiet (Lichtenwörth) 149

Abbildung 60 Regression zwischen dem N-Gehalt der Biomasse und dem CO_2 - und N_2O -Fluss im Trockengebiet (Lichtenwörth) 150

Abbildung 61 Regression zwischen dem N-Gehalt der Biomasse und dem CO_2 - und N_2O -Fluss im Feuchtgebiet (Pötting) 151

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Begrünungsvarianten (vgl. NEUBAUER, 2008, 31) 9

Tabelle 2 Bodenkartierung Ort/Innkreis 1 46

Tabelle 3 Bodenkartierung Ort/Innkreis 2 47

Tabelle 4 Bodenkartierung Pötting 49

Tabelle 5 Bodenkartierung Bad Wimbsbach – Neydharting 52

Tabelle 6 Bodenkartierung Lichtenwörth 59

Tabelle 7 Bodenkartierung Wulkaprodersdorf 62

Tabelle 8 Messmethoden 74

Tabelle 9 Varianzanalyse Oberirdische Biomasse 81

Tabelle 10 Varianzanalyse Stickstoffgehalt 91

Tabelle 11 Varianzanalyse C/N-Verhältnis 91

Tabelle 12 Varianzanalyse $N_{\min}$ 104

Tabelle 13 Varianzanalyse Lachgas Pötting 118

Tabelle 14 Varianzanalyse Kohlendioxid Pötting 123

Tabelle 15 Varianzanalyse Lachgas Lichtenwörth 130

Tabelle 16 Varianzanalyse Kohlendioxid Lichtenwörth 135

11. Literaturverzeichnis

AGRARMARKT AUSTRIA (2007): ÖPUL 2007 – Begrünung von Ackerflächen. Published by Agrarmarkt Austria, at: http://www.ama.at/Portal.Node/public?genetics.rm=PCP&genetics.pm=gti_full&p.contentid=10008.47321&MEBBGR.pdf (25.02.2013).

BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G.W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K. und WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel, Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

BODNER, G.; SUMMERER, H.; ECKER, F. und ROSNER, J. (2011): Zwischenfruchtbau ist auch im Trockengebiet machbar. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft- Ländlicher Raum. Published by Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, at: http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDQQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.lebensministerium.at%2Fdms%2Fmat%2Fland%2Flaendl_entwicklung%2FOnline-Fachzeitschrift-Laendlicher-Raum%2FBodner%2FBodner_Zwischenfruchtbau.pdf&ei=uWaBUdqTGYSX1AWauoD4Dw&usg=AFQjCNH9HwK1zhp3V6nhPM62UlkdGWdaAw&bvm=bv.45921128,d.d2k (01.05.2013).

BODNER, G. (2012): Projektantrag StartClim2012 - Boden als Ressource im Klimawandel. s.l.: unveröffentlichtes Skript.

BÖHM, K. und HÖSCH, J. (2011): Der Zwischenfruchtanbau als Instrument der Stoffkonservierung. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 6.

BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD; NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT (2013): eBOD. Published by Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, at: <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7066> (28.02.2013).

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- und FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT und WASSERWIRTSCHAFT (2012): Agrarumweltmaßnahme (ÖPUL) - Flächen, Betriebe und Leistungsabgeltungen nach Maßnahmen im Zeitvergleich seit 1995 (1). Published by

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, at:
http://www.agraroekonomik.at/fileadmin/tabellen/Tab_2012_50216_OEPUL_Masnahmen_Zeitvergleich.xls (14.03.2013).

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- und FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT und
WASSERWIRTSCHAFT (2012): Grüner Bericht 2012. Wien: AV+Astoria Druckzentrum GmbH.

GOLLNOW, S. (2008): Einfluss der landwirtschaftlichen Erzeugung auf die CO₂-Bilanz eines
Brottes- dargestellt am Beispiel Märkisches Landbrot. Eberswalde: Bachelorarbeit
Fachhochschule Eberswalde.

HACKL, A. und SCHLEICHER, S. (2000): Lachgasemissionen und Klimaschutz. Schriftenreihe
des österreichischen Klimabeirates- Innovation für Wirtschaft und Klimaschutz. Wien:
Service Fachverlag.

HAMPL, U. (1996): Gründüngung. Graz: Leopold Stocker Verlag.

KAMP, T. (1998): Freiland- und Laboruntersuchungen zu N₂O Freisetzungen eines
landwirtschaftlich genutzten Bodens unter definierten Temperaturbedingungen. FAM-
Bericht 30. Aachen: Shaker Verlag.

KASTENHUBER, F. (2008): Zwischenfruchtanbau – darauf kommt's an!. Der fortschrittliche
Landwirt 13, 26 - 27.

KASTENHUBER, F. (2010): Welche Zwischenfrüchte für welche Standorte am besten geeignet
sind. Published by BauernZeitung, at:
<http://www.bauernzeitung.at/index.php?id=2500%2C94286%2C%2C> (25.02.2013).

LEICK, B. (2003): Emission von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich
genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation
Universität Hohenheim. Published by: Universität Hohenheim Fachinstitut für
Pflanzenernährung, at: [http://opus.ub.uni-
hohenheim.de/volltexte/2004/49/pdf/Diss_Leick.pdf](http://opus.ub.uni-hohenheim.de/volltexte/2004/49/pdf/Diss_Leick.pdf) (11.05.2013).

LÜTKE ENTRUP, N. (2001): Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau.
Gelsenkirchen: Verlag Th. Mann.

LÜTKE ENTRUP, N. (1991): Zwischenfrüchte im integrierten Pflanzenbau. Bonn: Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID) e.V.

MESSNER, I. (2010): Untersuchung der CO₂-Emissionen eines lehmigen Schluffbodens bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Wien: Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien.

MOTZ, I. (2003): Einfluß von Bodenbearbeitung, Düngung und Fruchtfolge auf die Lachgasemissionen aus Ackerflächen. Universität Hohenheim: Selbstverlag.

NIELSEN, D. und WENDROTH, O. (2003): Spatial and Temporal Statistics - Sampling Field Soils and their Vegetation. Reiskirchen: Catena-Verlag.

N.N. (s.a.): DOC. Published by Wasser Wissen- Das Internetportal für Wasser und Abwasser, at: <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/d/doc.htm> (24.08.2013).

PARKIN, T. B. (1987): Soil Microsites as a Source of Denitrification Variability. Soil Sci. Soc. Am. J. 51.

PETERSEN, S. O.; MUTEGI, J. K.; HANSEN, E. M. und MUNKHOM, L. J. (2011): Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. Soil Biology and Biochemistry 43. Published by Department of Agroecology and Environment, Aarhus University, at: [http://www.uni-kassel.de/~w_dec/Christiane/Literatur/catch%20crop/Petersen et al 2011 Cover Crop N2O.pdf](http://www.uni-kassel.de/~w_dec/Christiane/Literatur/catch%20crop/Petersen_et_al_2011_Cover_Crop_N2O.pdf) (15.11.2012).

RENIUS, W.; LÜTKE ENTRUP, E. und LÜTKE ENTRUP, N. (1992): Zwischenfruchtbau zur Futtergewinnung und Gründüngung- ein Baustein zur Bodenfruchtbarkeit und zum Umweltschutz. Frankfurt am Main: DLG- Verlag.

RWA (s.a.): Ackergrün- Winterbegrünungen, Flächenstilllegungen. Published by RWA, at: <http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.rwa.at%2Fnetautor%2Fnapro4%2Fwrapper%2Fmedia.php%3Fid%3D%252C%252C%252C%252CZmlsZW5hbWU9YXJjaGl2ZSUzRCUyRjIwMDcuMDcuMjQIMkYxMTg1MjgwMjQ2LnBkZiZybj1BY2tldmlydWVuRm9sZGVyMDUucGRm&ei=MG2BUbWUCO6z0QXoioCoCw&usg=AFQjCNEkrKLfaipLrIVIS820FyQySvR2uQ&bvm=bv.45921128,d.d2k> (01.05.2013).

SAATBAU LINZ (s.a.): Published by Saatbau Linz, at:

http://www.saatbaulinz.at/sor_showSorte.asp?id=614 (02.05.2013).

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K.H. und SCHWERTMANN, U. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.

SCHMID, M.; NEFTEL, A. und FUHRER, J. (2000): Lachgasemissionen aus der Schweizer Landwirtschaft. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz. Schriftenreihe der FAL 33.

SCHWALM, M. (s.a.): Methoden der Kohlenstoffmessung im Gelände und im Labor- Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC). Published by Humboldt - Universität zu Berlin, at: <http://hu-bodenkunde.de/carlos/B01doc.html> (24.08.2013).

SEHY, U. (2004): N₂O- Freisetzungen aus Ackerböden- Der Einfluss der Bewirtschaftung und des Standortes. München: ökom verlag, Gesellschaft für ökologische Kommunikation mbh.

SKW STICKSTOFFWERKE PIESTERITZ GMBH (s.a.): Publishd by SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, at:

<http://www.duengerfuchs.de/files/Download/Faktencheck%20Harnstoff%2003.pdf> (10.05.2013).

STADLER, M. (s.a.): Published by Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

Pfaffenhofen a.d. Ilm, at: http://www.aelf-ph.bayern.de/pflanzenbau/linkurl_10.pdf (02.05.2013).

STEINBEISS, S. (2006): Einfluss der Biodiversität von Pflanzen auf die Speicherung von Kohlenstoff in Böden und auf den Austrag von gelöstem organischem Kohlenstoff. Jena: Dissertation Friedrich – Schiller – Universität Jena.

THOMSON, A. J.; GIANNOPOULOS, G; PRETTY, J.; BAGGS, E. M. und RICHARDSON, D. J. (2012): Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. Philosophical transactions of the royal society. Biological sciences. Published by University of East Anglia, Aberdeen and Essex, at:

<http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/suppl/2012/03/29/rstb.2011.0415.DC1.html>
(23.09.2012).

VEREIN OÖ. WASSERSCHUTZBERATUNG. (2012): Gewässerschutz durch Zwischenfruchtanbau. Published by Verein Oö. Wasserschutzberatung, at: http://www.ooe-wsb.at/xbcr/SID-49C45273-54C07AB5/ZWISCHENFRUCHTANBAU_jo_06112012.pdf
(14.03.2013).

VEREIN OÖ WASSERSCHUTZBERATUNG (2010): Begrünung von Ackerflächen. Published by Verein Oö. Wasserschutzberatung, at: http://www.ooe-wsb.at/xchg/SID-EFB73525-0A0EC4E9/hs.xsl/83_DEU_HTML.htm (25.03.2013).

WALLNER, T. (s.a.): Zwischenfruchtanbau. Oö. Wasserschutzberatung: Linz.

WELTATLAS.INFO (2013): Österreichkarte, at: <http://www.weltatlas.info/oesterreich/landkarte/> (15.10.2013).