

Förderinitiative Verminderung von Stickstoffemissionen

Optimierung des Stickstoffmanagements und Erhöhung der Ökoeffizienz bei Raps (*Brassica napus* L.) durch sensorgesteuerte teilflächenspezifische Stickstoffdüngung

Projektendbericht, AZ 307 42

Beat Vinzent, Franz Xaver Maidl, Kurt-Jürgen Hülsbergen
Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und
Pflanzenbausysteme

Projektbeginn: 01.01.2013

Laufzeit: 36 Monate

Freising, 30.09.2016

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	307 42	Referat	34	Fördersumme	326 232 €
Antragstitel		Optimierung des Stickstoffmanagements und Erhöhung der Ökoeffizienz bei Raps (<i>Brassica napus</i> L.) durch sensorgesteuerte teilflächenspezifische Stickstoffdüngung			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
3 Jahre 6 Monate		01.01.2013			
Zwischenberichte		2			
31.12.2013		31.12.2014			
Bewilligungsempfänger			Technische Universität München		Tel 08161 71 3032
			Lehrstuhl für Ökolandbau und Pflanzenbausysteme		Fax 08161 71 3031
			Liesel-Beckmann-Straße 2		Projektleitung Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen
			85354 Freising		Bearbeiter M.Sc. Beat Vinzent
Kooperationspartner					

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Winterraps gehört in Deutschland zu den wichtigsten Fruchtarten. Im Vergleich zu anderen Kulturarten treten beim Rapsanbau häufig hohe N-Salden und N_{min} -Werte auf. Die N-Effizienz ist relativ gering, weil mit dem Samenertrag nur wenig Stickstoff vom Feld abgefahren wird und somit N-Verluste in Form von Nitrat (NO_3^-) und Lachgas (N_2O) auftreten können. Hohe N_2O -Verluste wirken sich negativ auf die Treibhausgas- und Ökobilanz der Bioenergielinie Rapsmethylester aus.

Es wurde deshalb untersucht, welchen Einfluss eine differenzierte N-Düngung und verschiedene Rapsgeotypen auf die N-Effizienz von Winterraps haben. Außerdem wurde die Frage bearbeitet, welche Wirkungen unterschiedliche Nach- und Zwischenfrüchte sowie eine differenzierte Bodenbearbeitung nach der Rapsernte auf die N_2O -Dynamik im Boden haben. Das Gesamtziel ist eine deutliche Verringerung der bodenbürtigen N_2O -Emissionen während und nach dem Rapsanbau.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

In einem Feldexaktversuch wurden ganzjährig N_2O -Proben gewonnen und anschließend mittels Gaschromatographie analysiert. Versuchsbegleitend wurden regelmäßig Boden- und Pflanzenproben für die genaue Charakterisierung des Stickstoffkreislaufes Boden – Pflanze – Atmosphäre gewonnen. Die Feldversuche wurden in Doppelparzellen angelegt, um eine ungestörte Ermittlung des Ernteertrages möglich zu machen. Die Messparzellen wurden (soweit möglich und sinnvoll, je nach im Witterung) fast ausnahmslos über die gesamte Versuchsdauer in einem festen Rhythmus zweimal pro Woche beprobt, um möglichst fundierte Aussagen treffen zu können (Interpolation der Messergebnisse, Erfassung aller wichtigen Emissionsereignisse).

Es wurden Handhauben mit einer relativ großen Grundfläche von 0,6 m x 0,6 m verwendet. Im Rapsdüngungsversuch wurde in der Variante mit TUMA-Düngesystem der N-Düngebedarf im Frühjahr durch multispektrale Analyse des Pflanzenbestandes im Herbst ermittelt.

Ergebnisse und Diskussion

Im Nacherntemanagement nach Winterraps emittierten alle Versuchsvarianten, mit der Ausnahme von Weidelgras im ersten Versuchsjahr, durchwegs sehr wenig N₂O. Eine differenzierte Bodenbearbeitungsintensität zeigte in beiden Untersuchungsjahren wie auch der Anbau unterschiedlicher Zwischenfrüchte keinen signifikanten Einfluss auf das N₂O-Emissionsniveau. Einzig die Wahl der nachfolgenden Hauptfrucht stellte verglichen mit Winterweizen signifikant höhere N₂O-Emissionen unter Wintergerste heraus. Die N₂O-Emissionen schwankten zwischen 0,32 und 2,05 kg ha⁻¹ für den Messzeitraum von jeweils ca. 8 Monaten in beiden Jahren, lagen meistens jedoch am unteren Ende der Skala. Das Nacherntemanagement zeigte Potentiale, aber vor allem auch Grenzen ackerbaulicher Maßnahmen zur Konservierung von N-Überhängen nach der Winterrapsenernte auf. Das bewährte Fruchtfolgeglied Raps – Weizen scheint unter den Bedingungen reiner Marktfruchtbetriebe neben anderen auch aus Sicht der Treibhausgasemissionen keine schlechte Lösung zu sein, wenn man es mit den übrigen Versuchsvarianten vergleicht. Zwischenfrüchte können mit Sicherheit einen großen Anteil an der N-Konservierung nach Winterraps einnehmen, wenngleich die Wahl einer geeigneten Zwischenfrucht sich nicht nur an ihrer N-Aufnahme orientieren muss.

Die Messergebnisse zum Vergleich unterschiedlicher N-Düngungsstrategien zeigen, dass es je nach Terminierung und Höhe der N-Düngung zur deutlichen Beeinflussung der N₂O-Emissionen kommt. Die gemessenen N₂O-Emissionen waren in den Untersuchungsjahren auf relativ niedrigem Niveau zwischen 0,29 und 2,74 kg ha⁻¹. Mit dem sensorgestützten TUMA-Düngesystem für Winterraps wurden durch die bedarfsgerechte Aufteilung der N-Düngergaben deutliche Düngereinsparungen ohne Ertragseinbußen sowie eine tendenzielle Minderung der N₂O-Emissionen erreicht.

Für den Standort Roggenstein wurden aus den gemessenen Emissionen Emissionsfaktoren von 0,55 und 0,69 % des eingesetzten Stickstoffdüngers abgeleitet. Die gemessenen kumulierten N₂O-Emissionen waren deutlich geringer, als mit dem GNOC-Tool kalkulierte Werte für diese Region. Demnach kam es trotz hoher Niederschläge am Standort aufgrund gut dränender Böden nur selten zur Sauerstoffarmut und reduzierenden Bedingungen im Boden, die für eine erhöhte N₂O-Bildung nötig gewesen wären.

In der Düngung konnte gezeigt werden, dass sich nicht nur die Staffelung der N-Menge, sondern auch ihre Terminierung abhängig von der Witterung zeitweise stark auf die N₂O-Dynamik auswirken kann. So müssen gesteigerte N-Düngergaben nicht zwingend mit einer Erhöhung der N₂O-Emissionen verbunden sein, wenn sich die Gaben an der Bestandesentwicklung orientiert. Gerade Ansätze des precision farming wie das TUMA-Düngesystem zu Winterraps greifen mit ihrem Algorithmus diese Grundsätze auf und setzen sie in eine klimaverträgliche Düngung um.

Darüber hinaus konnten beim Vergleich von Halbzwerghybriden und anderen Genotypen Potentiale und Grenzen der N-Verwertung identifiziert werden. Mit Blick auf die Sortenwahl bleibt unter dem Eindruck der hier geprüften Genotypen festzuhalten, dass sich Halbzwerghybriden bei moderater N-Düngung in ihren N-Bilanzen nicht von anderen Genotypen unterscheiden. Bei gesteigertem N-Angebot konnten sie den zusätzlichen Stickstoff allerdings nicht in gleichem Maß in Kornertrag umsetzen wie Normalhybriden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse der Forschungstätigkeit wurden im Rahmen von Vorträgen auf der Jahrestagung der deutschen Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 2014 in Wien, des internationalen Workshops zum klimaeffizienten Rapsanbau am Thünen-Institut in Braunschweig im März 2015 sowie des Bioenergieforums auf der Agritechnica im November 2015 in Hannover vorgestellt. Weiterhin wurden in jedem Jahr am Versuchsstandort Roggenstein öffentliche Feldtage abgehalten, in deren Rahmen zahlreiche Projekt- und Ergebnispräsentationen stattfanden.

Fazit

Trotz niedrigen Emissionsniveaus unter den Bedingungen des Marktfruchtanbaus im süddeutschen Raum bieten sich nach neuesten Erkenntnissen weitere Potentiale zur Steigerung der treibhausgasemissionsarmen Erzeugung von Winterraps. Mit pflanzenbaulicher Weitsicht und computergestützten Düngesystemen lassen sich bereits effizient geführte Fruchtfolgen mit Winterraps weiter optimieren.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Zusammenfassung.....	VIII
1 Zielstellung des Projektes.....	9
1.1 Problemstellung.....	9
1.2 Forschungsbedarf.....	9
1.3 Forschungsansatz.....	10
1.4 Arbeitshypothesen.....	10
2 Material und Methoden.....	11
2.1 Standortbedingungen.....	11
2.2 Versuchsbeschreibung Nacherntemanagement.....	12
2.3 Versuchsbeschreibung Rapsdüngungsversuche.....	14
2.4 Versuchsbeschreibung Winterrapsgenotypen.....	15
2.5 N ₂ O- und Laboranalysen.....	16
3 Ergebnisse.....	18
3.1 Nacherntemanagement.....	18
3.1.1 N-Aufnahme in der Biomasse.....	18
3.1.2 N ₂ O-Flüsse und kumulierte N ₂ O-Emissionen.....	19
3.2 Versuche zur Rapsdüngung.....	25
3.2.1 Einfluss der N-Menge auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N ₂ O-Emissionen.....	25
3.2.2 Wirkung einer N-Steigerung auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N ₂ O-Emissionen.....	29
3.2.3 Wirkung der Herbst-N-Düngung auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N ₂ O-Emissionen.....	33
3.2.4 Wirkung der Terminierung der N-Düngung im Frühjahr auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N ₂ O-Emissionen.....	37
3.2.5 Wirkung eines N-Düngesystems auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N ₂ O-Emissionen.....	45
3.3 Wirkung unterschiedlicher Rapsgenotypen auf die Effizienz der N-Düngung.....	49
3.4 Produktbezogene Betrachtung der N ₂ O-Emissionen.....	57
3.5 Ermittlung von N ₂ O-Emissionsfaktoren für den Standort Roggenstein.....	58
3.6 Vergleich der gemessenen N ₂ O-Emissionen mit Modelldaten aus GNOC.....	59
4 Diskussion.....	61
5 Öffentlichkeitsarbeit.....	63
6 Fazit.....	64
7 Literaturangaben.....	65
Anhang.....	LXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Witterungsverlauf und ausgewählte Bodenparameter am Standort Roggenstein	11
Abbildung 2: Messhauben im Winterrapsbestand	16
Abbildung 3: N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse in 2013/14, Tukey-Test für $\alpha = 0,05$	18
Abbildung 4: N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse in 2014/15, Tukey-Test für $\alpha = 0,05$	19
Abbildung 5: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau von Winterweizen und Wintergerste nach Winterraps	20
Abbildung 6: Kumulierte N ₂ O-Emissionen unter Gerste und Weizen nach Raps	21
Abbildung 7: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau von Rapsweizen unter differenzierter Bodenbearbeitung	22
Abbildung 8: Kumulierte N ₂ O-Emissionen unter Rapsweizen bei differenzierter Bodenbearbeitung ...	23
Abbildung 9: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau Senf und Weidelgras nach Raps	24
Abbildung 10: Kumulierte N ₂ O-Emissionen unter Senf und Weidelgras nach Raps	25
Abbildung 11: N-Aufnahme Varianten (0/0/0) und (0/120/60)	26
Abbildung 12: Ölertrag für die Varianten 0/0/0 und 0/120/60	26
Abbildung 13: N-Bilanz für die Varianten 0/0/0 und 0/120/60.	27
Abbildung 14: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/0/0 und 0/120/60	28
Abbildung 15: N-Aufnahme in den Varianten 40/60/60 und 40/120/120	29
Abbildung 16: Ölerträge für die Varianten 40/60/60 und 40/120/120	30
Abbildung 17: N-Saldo für die Varianten 40/60/60 und 40/120/120	30
Abbildung 18: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/60/60 und 40/120/120	32
Abbildung 19: N-Aufnahme in den Varianten 0/120/60 und 40/120/60	33
Abbildung 20: Ölerträge für die Varianten 0/120/60 und 40/120/60	34
Abbildung 21: N-Salden für die Varianten 0/120/60 und 40/120/60	34
Abbildung 22: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/120/60 und 40/120/60	36
Abbildung 23: N-Aufnahme in der Variante 0/120/60 und 0/60/120	37
Abbildung 24: Ölerträge in den Varianten 0/120/60 und 0/60/120	38
Abbildung 25: N-Bilanzen in den Varianten 0/120/60 und 0/60/120	38
Abbildung 26: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/120/60 und 0/60/120	40
Abbildung 27: N-Aufnahme in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160	41
Abbildung 28: Ölertrag in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160	42
Abbildung 29: N-Bilanzen in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160	42
Abbildung 30: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/160/0 und 40/0/160	44
Abbildung 31: N-Aufnahme in den Varianten 40/120/60 und TUMA	45
Abbildung 32: Ölerträge in den Varianten 40/120/60 und TUMA	46
Abbildung 33: N-Bilanz in den Varianten 40/120/60 und TUMA	46
Abbildung 34: N ₂ O-Flüsse, N _{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/120/60 und TUMA	48
Abbildung 35: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch	49
Abbildung 36: Ölerträge der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch	50
Abbildung 37: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch	51
Abbildung 38: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch	51
Abbildung 39: Ölerträge der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch	52
Abbildung 40: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch	53
Abbildung 41: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch	54
Abbildung 42: Ölerträge der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch	54
Abbildung 43: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch	55
Abbildung 44: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/60/120 im Sortenversuch	56

Abbildung 45: Ölerträge der Düngungsvariante 40/120/60 im Sortenversuch.....	56
Abbildung 46: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/60/120 im Sortenversuch	57
Abbildung 47: Produktbezogene und N-Bilanz-abhängige N ₂ O-Emissionen für Roggenstein	58
Abbildung 48: N-Inputabhängige N ₂ O-Emissionsraten am Standort Roggenstein	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Witterung am Standort Roggenstein	11
Tabelle 2: Variantenbeschreibung Nacherntemanagement.....	13
Tabelle 4: Variantenübersicht zur N-Düngung im Winterraps.....	14
Tabelle 4: Variantenübersicht zum Sortenversuch im Winterraps	15
Tabelle 5: Gemessene und berechnete N ₂ O-Emissionen unter Raps am Standort Roggenstein (in kg ha ⁻¹ +/- Standardabweichung).....	60

Zusammenfassung

Winterraps ist die bedeutendste Ölpflanze in Deutschland, die derzeit auch bei der Eiweißversorgung unverzichtbar ist. Die Anbaufläche von Raps beträgt aktuell knapp 1,3 Millionen Hektar. Im Vergleich zu anderen Kulturarten können beim Rapsanbau hohe N-Salden und N_{\min} -Werte auftreten. Die N-Effizienz ist relativ gering, weil mit dem Samenertrag nur wenig Stickstoff vom Feld abgefahren wird und somit N-Verluste in Form von Nitrat und Lachgas (N_2O) auftreten können. Hohe N_2O -Verluste wirken sich negativ auf die Treibhausgas- und Ökobilanz der Bioenergielinie Rapsmethylester aus.

Die Kenntnisse über die N_2O -Emissionen im Rapsanbau in Abhängigkeit von Standort, N-Intensität und Nacherntemanagement sind noch unzureichend (WALTER ET AL., 2014). Damit ist es bisher weder möglich, die durch den Rapsanbau verursachten Treibhausgasflüsse hinreichend genau abzuschätzen, noch den Effekt von Minderungsstrategien zuverlässig zu beurteilen.

In den Jahren 2013 bis 2015 wurden in Feldexperimenten mit Winterraps in der Versuchsstation Roggenstein der TU München die Wirkungen der N-Düngung (Menge, Terminierung und N-Düngesysteme des precision farming), der Bodenbearbeitung und Fruchtfolge auf die Ertragsbildung, die N-Aufnahme, die N_{\min} -Dynamik und die N_2O -Emissionen untersucht. Auf der Grundlage dieser experimentellen Daten wurde abgeleitet, welche Relevanz die N_2O -Emissionen für die Klimabilanz der Bioenergielinie Rapsmethylester (RME) haben und wie sich N_2O -Emissionen beim Rapsanbau verringern lassen.

Im Nacherntemanagement nach Winterraps wurden in allen Versuchsvarianten sehr geringe N_2O -Emissionen ermittelt. Die Emissionen schwankten zwischen 0,32 und 2,05 kg ha⁻¹ für den Messzeitraum von jeweils ca. 8 Monaten in beiden Jahren, lagen meistens jedoch am unteren Ende der Skala. Eine differenzierte Bodenbearbeitungsintensität und der Anbau unterschiedlicher Zwischenfrüchte hatten keinen signifikanten Einfluss auf das N_2O -Emissionsniveau. Bei der Nachfrucht Wintergerste wurden signifikant höhere N_2O -Emissionen als bei der Nachfrucht Winterweizen festgestellt.

Die gemessenen N_2O -Emissionen waren in den Untersuchungsjahren auf relativ niedrigem Niveau zwischen 0,29 und 2,74 kg ha⁻¹. Die Terminierung wie auch die Höhe der Düngung beeinflussten die N_2O -Emissionen maßgeblich. Mit dem sensorgestützten TUMA-Düngesystem für Winterraps wurden durch die bedarfsgerechte Aufteilung der N-Düngergaben deutliche Düngereinsparungen ohne Ertragseinbußen sowie eine tendenzielle Minderung der N_2O -Emissionen erreicht. Darüber hinaus konnten beim Vergleich von Halbzwerghybriden mit Normalstrohhhybriden der Einfluss des Genotyps auf die N-Verwertung ermittelt werden.

Für den Standort Roggenstein wurden aus den gemessenen Emissionen mit 0,55 und 0,69 % N_2O -Emissionsfaktoren abgeleitet. Die gemessenen kumulierten N_2O -Emissionen waren deutlich geringer, als mit dem GNOC - Tool kalkulierten Werte für diese Region. Demnach kam es trotz hoher Niederschläge am Standort aufgrund gut dränender Böden nur selten zur Sauerstoffarmut und reduzierenden Bedingungen im Boden, die für eine erhöhte N_2O -Bildung nötig gewesen wären.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Lösungsvorschläge für die Zukunft tragen zur Entlastung der Klimabilanz des aus Raps gewonnenen Öls für RME und andere energetische Zwecke bei. Sie geben ferner zukunftsweisende Anregungen für einen noch nachhaltigeren Rapsanbau aus Sicht der Stickstoffdüngung.

1 Zielstellung des Projektes

1.1 Problemstellung

Winterraps gehört in Deutschland zu den wichtigsten Fruchtarten. Neben seiner wirtschaftlichen Bedeutung besitzt er einen hohen Vorfruchtwert und trägt zur Auflockerung getreidereicher Fruchtfolgen bei. Durch intensive züchterische Bearbeitung konnte das Ertragspotenzial in den vergangenen zwei Jahrzehnten deutlich gesteigert werden. Die Rapsanbaufläche in Deutschland erreichte im Anbaujahr 2014/15 1,29 Millionen Hektar (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016), die Hälfte davon wurde für die Gewinnung von Pflanzenöl zur energetischen Verwertung genutzt (FNR, 2015).

Im Vergleich zu anderen Kulturarten treten beim Rapsanbau häufig hohe N-Salden und N_{\min} -Gehalte auf. Obwohl der Raps sehr hohe N-Mengen aufnehmen kann, ist die N-Effizienz relativ gering, weil mit dem Samenertrag meist deutlich weniger Stickstoff vom Feld abgefahren wird, als gedüngt wurde (RATHKE ET AL., 2006). Nach der Rapsernte verbleiben bedeutende N-Mengen mit den Ernterückständen im Boden bzw. auf der Bodenoberfläche, die je nach Bodenbearbeitungsintensität, Folgekultur und Mineralisierungsverlauf zu sickerwassergebundenen Nitratverlusten und N_2O -Emissionen führen können. Hohe N_2O -Verluste wirken sich negativ auf die Treibhausgas- und Ökobilanz der Bioenergielinie Rapsmethylester aus (GÄRTNER & REINHARDT, 2003; CRUTZEN, 2008; LEOPOLDINA, 2012) und sollten durch geeignete Anbaumaßnahmen minimiert werden.

1.2 Forschungsbedarf

Generell sind die Kenntnisse über die N_2O -Emissionen im intensiven Rapsanbau – gemessen an der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Kulturart, der Anbaufläche und der N-Verlustrisiken – noch unzureichend. Vorliegende Versuchsergebnisse sind auf relativ wenige Standorte, Anbau- und N-Düngungssysteme beschränkt (WALTER ET AL., 2014). Es gibt einige ältere wissenschaftliche Arbeiten zu N_2O -Emissionen beim Anbau von Raps in Deutschland, die jedoch mit geringen, heute nicht mehr praxisüblichen N-Gaben und/ oder auf Standorten mit sehr geringem N_2O -Emissionspotenzial durchgeführt wurden (KAISER ET AL., 1998; SCHMÄDECKE, 1998; HELLEBRAND ET AL., 2008). Damit ist es bisher weder möglich, die durch den Rapsanbau verursachten Treibhausgasflüsse hinreichend genau abzuschätzen, noch den Effekt von Minderungsstrategien zuverlässig zu beurteilen¹.

Aufgrund der schlechten Datenlage wurden bisher bei der Ökobilanzierung von Rapsmethylester die N_2O -Emissionen entweder ganz vernachlässigt, oder nur pauschale Emissionswerte angesetzt (GÄRTNER & REINHARDT, 2003). Die Vorgaben an die Ökoeffizienz von Biokraftstoffen mit einem Treibhausgasminderungspotential von derzeit 35 % in der Biokraftstoffnachhaltigkeitsverordnung sind sehr vereinfacht formuliert (BMELV, 2009). Bei der vereinfachten Kalkulation der Emissionen bleiben maßgebende Umweltfaktoren, differenzierte Anbausysteme sowie neue Anbautechniken und innovative Betriebsmittel unberücksichtigt. Die in der Verordnung geforderte Treibhausgasminderung bei Biodiesel steigt bis zum Jahr 2018 für neu in Betrieb genommene Produktionsanlagen auf 60 % und für Altanlagen auf 50 %.

In den vergangenen Jahren wurden N-Düngesysteme für Winterraps entwickelt, die die Vorwinterentwicklung und die N-Aufnahme der Rapsbestände bei der Bemessung der Frühjahrs-N-Gaben berücksichtigen. An der TU München wurden Mess- und Regelalgorithmen für eine sensorbasierte teilflächenspezifische N-Düngung der Kulturart Winterraps erarbeitet (MAIDL & SPICKER, 2012, SPICKER 2016). Die Effekte dieser neuen Düngesysteme auf die Ertragsbildung, die N-Effizienz und die N-Verluste sind bisher kaum untersucht; hier besteht intensiver Forschungsbedarf.

Zudem gibt es mit Halbzwerghybriden Rapsgenotypen, die während ihres Wuchses weniger Biomasse bilden. Dies könnte Einfluss auf die auf dem Feld verbleibende Rest-Biomasse, die N_{\min} -Dynamik im

¹ Aufgrund der Bedeutung der N_2O -Emissionen im Rapsanbau wurde neben diesem von der DBU geförderten Forschungsprojekt ein Verbundprojekt zur Verbesserung der Ökoeffizienz im Winterrapsanbau von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) initiiert.

Boden sowie die N-Emissionen haben. Auch zu dieser Fragestellung liegen bisher nur wenige experimentelle Daten vor.

Im Bereich des Nacherntemanagements gibt es verschiedene acker- und pflanzenbauliche Möglichkeiten, auf die N-Umsetzung im Boden, die N-Aufnahme durch Kulturpflanzen und die N₂O-Emissionen Einfluss zu nehmen.

Verbesserte Bodenbearbeitungs- und Sätechnik, optimierter Zwischenfruchtanbau und die Wahl geeigneter Nachfrüchte in der Fruchtfolge sind Ansätze zur stickstoffkonservierenden Bewirtschaftung nach Winterraps, die hinsichtlich ihrer Wirkungen geprüft werden sollten.

Für die Umsetzung in der Praxis ist es wichtig zu wissen, welche Effekte diese Maßnahmenansätze auf die Ertragsbildung und die N-Effizienz der Winterrapsproduktion haben. Insgesamt besteht bedeutender Forschungsbedarf, die Stickstoffdynamik, die Mineralisierungs- und N-Verlustprozesse während und nach dem Winterrapsanbau bei der Anwendung neuester agronomischer Möglichkeiten zu analysieren.

1.3 Forschungsansatz

In Feldexperimenten mit Winterraps wurden in den Jahren 2013, 2014 und 2015 folgende Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- der Einfluss unterschiedlicher Düngungsvarianten (Düngermenge, Düngungstermin, Düngungssystem) auf die N-Effizienz und N₂O-Emissionen von Winterraps (Untersuchungen im Produktionsverfahren, von der Rapsaussaat bis zur -ernte),
- die Wirkungen unterschiedlicher Nach- und Zwischenfrüchte sowie einer differenzierten Bodenbearbeitung nach der Rapsernte auf die N₂O-Emissionen (Nacherntemanagement-Versuche).

Dazu wurden zeitlich hochauflösend die N_{min}-Dynamik im Boden, die N-Aufnahme der Pflanzenbestände und die N₂O-Emissionen untersucht. In einem weiteren Versuch wurden Normalstrohhybrid mit Halbzwerghybrid bezüglich ihrer N-Effizienz verglichen.

Übergeordnetes Ziel war es, experimentell zu prüfen, welche N₂O-Emissionen im Rapsanbau auftreten, wovon diese Emissionen abhängig sind, welche N-Minderungspotenziale im Rapsanbau bestehen und welche Relevanz dies für die Treibhausgasbilanz besitzt.

1.4 Arbeitshypothesen

1) Durch den Einsatz sensorgestützter N-Düngesysteme und wissenschaftlich begründeter N-Düngealgorithmen sind signifikante Minderungen der N-Verluste und N-Effizienzsteigerungen im Winterrapsanbau möglich. Einen großen Einfluss auf die N-Effizienz der Bestände hat neben der Höhe der N-Düngung auch ihre Terminierung.

2) Fruchtfolge und Bodenbearbeitung sind neben der N-Düngung wesentliche Einflussfaktoren, die die N-Dynamik und die N₂O-Verlustprozesse bestimmen. Bei der Abschätzung der N₂O-Verluste und zur Ableitung von N-Minderungsstrategien müssen diese Faktoren einbezogen werden.

3) Halbzwerghybriden können im Vergleich zu Normalstrohhybrid durch geringere Biomassebildung zur Verringerung des N-Düngebedarfs, der N-Aufnahme der Rapspflanzen, der N-Salden und zu einer höheren N-Effizienz beitragen.

4) Die Aussagekraft der Ökobilanz Raps – Rapsmethylester kann durch die gewonnenen Daten zu N₂O-Emissionen wesentlich verbessert werden. Es können nicht nur mittlere Emissionsraten, sondern die Variabilität der N₂O-Flüsse in Abhängigkeit von der N-Düngungsintensität und den Bewirtschaftungsbedingungen in die Bilanzierung einbezogen werden.

2 Material und Methoden

2.1 Standortbedingungen

Um die Ursachen und Einflussfaktoren von N₂O-Emissionen im Rapsanbau analysieren und besser verstehen zu können, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm auf der Basis der im Projektantrag beschriebenen Varianten und Versuchsansätze realisiert.

Die Feldversuche wurden auf Flächen der TUM-Versuchsstation Roggenstein (48°10'47"N 11°19'11"E) durchgeführt. Die Versuchsflächen liegen westlich von München im Übergangsbereich zwischen der Münchener Schotterebene und dem Endmoränengebiet der Würm. Die Standortbedingungen sind durch lehmig-sandige bis anmoorige Böden und hohe Jahresniederschläge (langjähriges Mittel von 1995 bis 2010: Niederschlag: 930 mm, Jahresdurchschnittstemperatur: 8,4 °C, Tabelle 1) gekennzeichnet.

Tabelle 1: Witterung am Standort Roggenstein

1995-2010	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Juni
Temperatur (°C)	17.7	17.3	12.8	9.0	3.3	-0.3	-1.2	0.9	3.9	8.5	13.1	16.2
Niederschlag (mm)	119	115	71	67	60	58	41	46	70	58	111	115
2013/14												
Temperatur (°C)	20.0	18.0	13.3	9.6	3.6	1.2	1.9	3.2	6.4	10.0	11.9	17.0
Niederschlag (mm)	33	98	96	79	57	10	65	13	25	32	67	32
2014/15												
Temperatur (°C)	17.9	16.0	13.9	11.0	5.3	2.7	1.2	-1.5	4.9	8.8	13.0	17.0
Niederschlag (mm)	155	95	72	84	46	58	85	19	55	65	138	130

Die Versuchsjahre waren durch milde Herbst- und Winterwitterung, sowie durch einen frühen Vegetationsbeginn gekennzeichnet. Es traten weder längere Frostphasen, noch ausgeprägte Frost-Tau-Zyklen auf, was intensive Messkampagnen während der Winterhalbjahre möglich machte. In Abbildung 1 ist der Witterungsverlauf für beide Messkampagnen sowie Bodenfeuchte und –Temperatur beispielhaft unter Winterraps dargestellt.

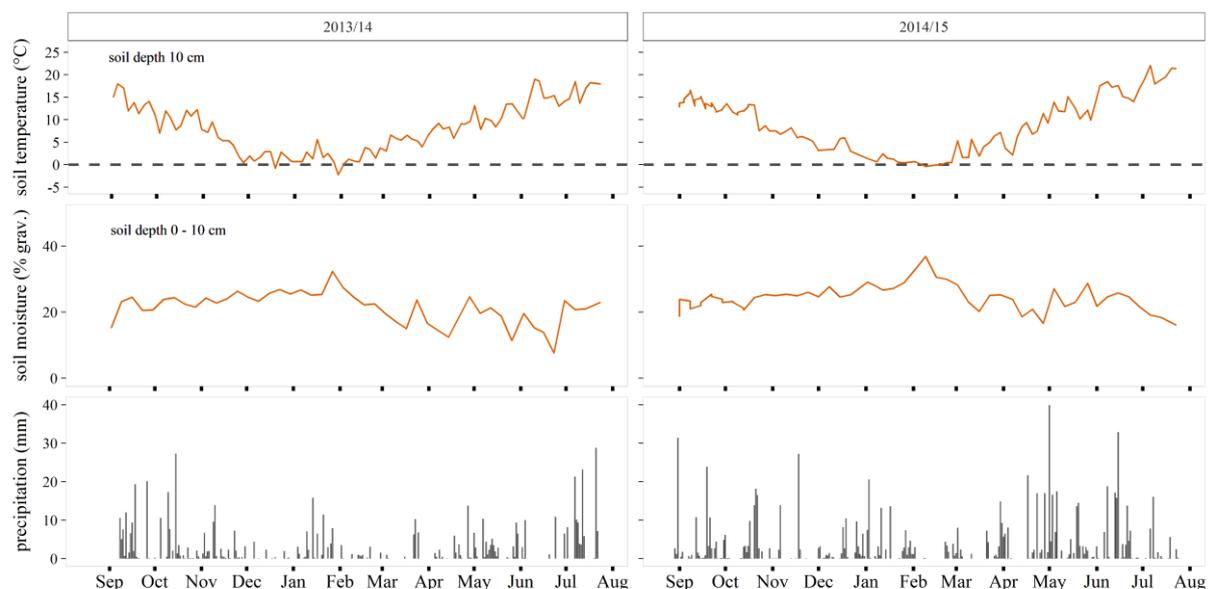


Abbildung 1: Witterungsverlauf und ausgewählte Bodenparameter am Standort Roggenstein

Übereinstimmend mit dem Projektantrag wurden der Mess- und Untersuchungsumfang so abgestimmt, dass sich eine wissenschaftlich anspruchsvolle, aber auch experimentell umsetzbare Gestaltung der Versuche ergab. So wurden die sensorgesteuerte teilflächenspezifische N-Düngung und andere N-Düngesysteme zu Raps um weitere N-Düngevarianten ergänzt, die sich bezüglich ihrer Höhe und Terminierung im Herbst wie im Frühjahr unterscheiden. Die Versuchsvarianten im Nacherntemanagement wurden möglichst praxisrelevant ausgestaltet. Vorfrüchte für die Rapsversuche waren im Jahr 2013/14 Wintergerste und im Jahr 2014/15 Sommergerste. Vor dem Nacherntemanagement war die Versuchsfläche einheitlich mit Winterraps bestellt.

2.2 Versuchsbeschreibung Nacherntemanagement

Die Haupt- und Zwischenfrüchte sowie die Bodenbearbeitungsintensität im Nachernterversuch wurden an die vorherrschenden Standortbedingungen am Versuchsstandort Roggenstein angepasst. Der Versuch wurde in beiden Jahren auf einem einheitlich bewirtschafteten Betriebsschlag mit Winterraps und betriebsüblicher Düngung angelegt. Zur Ernte 2013 wurde der Raps, der vor dem Versuch auf der Fläche stand mit 200 kg ha^{-1} Stickstoff gedüngt, zur Ernte 2014 waren es 230 kg ha^{-1} . Die N-Salden betrugen 61 kg ha^{-1} im Jahr 2013 bzw. 117 kg ha^{-1} in 2014 bei einem Ertragsniveau von 43 bzw. 38 dt ha^{-1} . Die Nacherntevarianten sind in Tabelle 2 genauer erläutert.

Tabelle 2: Variantenbeschreibung Nacherntemanagement

Variante	Maßnahmen	2013/14	2014/15
Winterweizen (intensive Bodenbearbeitung)			
Sorte: Kerubino	Mulchen Rapsstoppel	06. Aug.	25. Jul.
	Grubbern 5 cm tief	16. Aug.	07. Aug.
	Grubbern 12 cm tief	10. Sep.	19. Sep.
	Grubbern 20 cm tief	07. Okt.	08. Okt.
	Kreiselegge	08. Okt.	08. Okt.
	Drillsaat	08. Okt.	08. Okt.
Winterweizen (extensive Bodenbearbeitung)			
Sorte: Kerubino	Mulchen Rapsstoppel	06. Aug.	25. Jul.
	Grubbern 5 cm tief	16. Aug.	07. Aug.
	Glyphosat	01. Okt.	-
	Direktsaat	08. Okt.	08. Okt.
Wintergerste			
Sorte: Sandra	Mulchen Rapsstoppel	06. Aug.	25. Jul.
	Grubbern 5 cm tief	16. Aug.	07. Aug.
	Grubbern 12 cm tief	10. Sep.	-
	Grubbern 20 cm tief	24. Sep.	19. Sep.
	Kreiselegge	25. Sep.	19. Sep.
	Drillsaat	25. Sep.	19. Sep.
Welsches Weidelgras			
Sorte: Fabio	Mulchen Rapsstoppel	06. Aug.	25. Jul.
	Grubbern 5 cm tief	16. Aug.	07. Aug.
	Grubbern 20 cm tief	21. Aug.	19. Aug.
	Kreiselegge	24. Aug.	19. Aug.
	Drillsaat	24. Aug.	19. Aug.
	Schnitt	31. Okt.	14. Okt.
Gelbsenf			
Sorte: King	Mulchen Rapsstoppel	06. Aug.	25. Jul.
	Grubbern 5 cm tief	16. Aug.	07. Aug.
	Grubbern 20 cm tief	21. Aug.	19. Aug.
	Kreiselegge	24. Aug.	19. Aug.
	Drillsaat	24. Aug.	19. Aug.

2.3 Versuchsbeschreibung Rapsdüngungsversuche

Die in den Versuchen geprüften Varianten umfassen ein breites Spektrum der N-Zufuhr von 0 bis 280 kg ha⁻¹ (Tabelle 4). In 2013/14 wurde die Sorte Xenon ausgesät, in 2014/15 wurde die Sorte Avartar verwendet. Neben der N-Menge wurden mehrere Terminierungsvarianten im Herbst wie auch im darauffolgenden Frühjahr gewählt. Der Herbstschnitt im 4- bis 6-Blattstadium ist am Standort Roggenstein meistens Ende September terminiert, der Vegetationsbeginn Anfang März.

Tabelle 3: Variantenübersicht zur N-Düngung im Winterraps

Variante	Düngerart	N-Düngung im Herbst (kg ha ⁻¹)	N-Düngung zu Vegetations-Beginn (kg ha ⁻¹)	N-Düngung zu EC 30 (Schossbeginn) (kg ha ⁻¹)	Gesamte N-Düngermenge (kg ha ⁻¹)
0/0/0	-	-	-	-	0
TUMA	ASS	40	50	105 (in 2014) 100 (in 2015)	195 (in 2014) 190 (in 2015)
40/60/60	ASS	40	60	60	160
0/120/60	ASS	-	120	60	180
0/60/120	ASS	-	60	120	180
40/160/0	ASS	40	160	-	200
40/0/160	ASS	40	-	160	200
40/120/60	ASS	40	120	60	220
40/120/120	ASS	40	120	120	280

2.4 Versuchsbeschreibung Winterrapsgenotypen

Im den Versuchen mit unterschiedlichen Rapsgenotypen wurde die Wirkung auf die N-Effizienz geprüft. Hierzu wurden in vierfach wiederholten und randomisierten Blöcken ausgeführten N-Steigerungsversuchen in den Jahren 2013/14 zwei und in 2014/15 vier Sorten von Halbzwerghybriden und Liniensorten untersucht und verglichen (Tabelle 5). Die Sorten waren in 2013/14 Xenon als Normalhybride und die Halbzwerghybride P44D06. Im Jahr 2014/15 wurden als Normalhybride Avartar als frühreife bzw. PR46W20 als spätreife Hybride geprüft, erneut der Halbzwerghybrid P44D06 sowie die Liniensorte Arabella.

Tabelle 4: Variantenübersicht zum Sortenversuch im Winterraps

Variante	Düngerart	N-Düngung im Herbst	N-Düngung zu Vegetations-Beginn	N-Düngung zu EC 30 (Schoßbeginn)	Gesamte N-Düngermenge
		(kg ha⁻¹)	(kg ha⁻¹)	(kg ha⁻¹)	(kg ha⁻¹)
40/0/0	ASS	40	-	-	40
40/30/30	ASS	40	30	30	100
40/60/60	ASS	40	60	60	160
40/60/120	ASS	40	60	120	220

2.5 N₂O- und Laboranalysen

Um bei der Gewinnung der N₂O-Proben eine hohe Aussagekraft und geringe Fehlerquellen bei der Flussberechnung (LEVY ET AL. 2011) zu erreichen, wurde der Ablauf der Messungen nach den aktuellen Richtlinien zu Treibhausgasmessungen mittels manueller Haubentechnik (PARKIN UND VENTEREA 2010; KLEIN UND HARVEY 2015) durchgeführt. Die Messmethoden wurden in Abstimmung mit anderen nationalen Arbeitsgruppen² diskutiert, spezifiziert und angewendet.

Die Messparzellen wurden (soweit möglich und sinnvoll, je nach Witterung) fast ausnahmslos über die gesamte Versuchsdauer in einem festen Rhythmus zweimal pro Woche beprobt, um möglichst fundierte Aussagen treffen zu können (Interpolation der Messergebnisse, Erfassung aller wichtigen Emissionsereignisse).

In den Versuchen wurden in drei Wiederholungen pro Variante N₂O-Flüsse gemessen und anschließend im Labor untersucht³. Es wurden Handhauben (Abbildung 2) mit einer relativ großen Grundfläche von 0,6 m x 0,6 m ähnlich denen von DRÖSLER (2005) verwendet. So sollen eventuell auftretende Hot Spots der N₂O-Emissionen (räumliche Variabilität) abgemildert und die Datenqualität verbessert werden, wobei die Hauben trotzdem noch von einer Person bedient werden können.

Im Rapsdüngungsversuch wurde in der Variante mit TUMA-Düngesystem der N-Düngebedarf im Frühjahr durch multispektrale Analyse des Pflanzenbestandes im Herbst ermittelt. Nach der Feldüberfahrt mit einem Sensor, der den Ernährungszustand der Pflanzen charakterisiert, wurden mithilfe eines in der Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Maidl am Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme der TUM entwickelten Düngelgorithmus (TUMA-System) Menge und Verteilung des zu düngenden Stickstoffs im Frühjahr errechnet.



Abbildung 2: Messhauben im Winterrapsbestand

² Arbeitsgruppe Bodengase innerhalb der Kommission IV (Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenernährung) der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.

³ Die gaschromatographische Analyse und Auswertung der N₂O-Proben erfolgte in Kooperation mit dem Thünen-Institut für Agrarklimaschutz in Braunschweig.

Zur Analyse der N₂O-Emissionen wurden je Parzelle und Messereignis mittels Überdruckprobenehmer pro Stunde vier Gasproben mit jeweils 20 ml Volumen gewonnen, die anschließend in einem Gaschromatographen analysiert wurden. Die N₂O-Flussberechnung erfolgte mit dem Statistikprogramm R (R DEVELOPEMENT CORE TEAM 2008) und dem Package „*gasfluxes*“. Aufgrund neuester methodischer Erkenntnisse zur Modellwahl wurden die Emissionen im Jahr 2016 noch einmal mit überarbeiteten Standardfehlern bei der Modellwahl (FUSS UND PEDERSEN 2014) ausgewertet. Die kumulierten N₂O-Emissionen wurden aus dem Mittelwert zweier benachbarter Messereignisse über die Zeit zwischen den Messungen interpoliert. Die Grundeinheit des gemessenen N₂O-Flusses ist Mikrogramm N₂O pro Quadratmeter und Stunde.

Zusätzlich zu den N₂O-Messungen wurden weitere Messdaten erhoben. Während der Messungen von N₂O wurden die Luft- und Bodentemperatur aufgezeichnet. Diese Hintergrundinformationen dienen zur richtigen Interpretation der N₂O-Flüsse.

Wichtige Zusatzinformation zu den N₂O-Messungen stellen der Bodenwassergehalt und die NO₃⁻- und NH₄⁺-Mengen (beide zusammen als N_{min}) der Böden dar. Die Entnahme der Bodenproben erfolgte wöchentlich in einer Tiefe von 0 – 10 cm bzw. zusätzlich bis zu einer Tiefe von 30 cm im Abstand von vier Wochen. Alle N_{min}-Proben wurden einmal pro Woche von Hand auf den drei Wiederholungen des Feldversuchs gezogen. Die Bestimmung der N_{min}-Gehalte erfolgte photometrisch nach VDLUFA-Standard.

Der Schnitt von Biomasseproben wurde im Rapsdüngungsversuch zu entscheidenden Entwicklungsabschnitten (Herbst, Vegetationsbeginn, BBCH 30, BBCH 50, BBCH 65, BBCH 85) der Kultur durchgeführt. Im Nachernteversuch erfolgten die Biomassenschnitte zu Vegetationsende und zum Vegetationsbeginn im darauffolgenden Frühjahr. Die Ermittlung des N-Gehaltes erfolgt über C/N-Analyser und NIR-Spektroskopie. Wenn nachfolgend von statistischen Vergleichen gesprochen wird, wurden diese im Rahmen einer ANOVA mit $\alpha = 0,05$ ermittelt. Die statistischen Interferenzanalysen wurden ebenfalls mit dem Programm R (Version 3.3.1) durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Nacherntemanagement

3.1.1 N-Aufnahme in der Biomasse

Die Witterung begünstigte in beiden Versuchsjahren die Entwicklung der Folgekulturen (Zwischenfrüchte, Winterweizen, Wintergerste) nach Winterraps. Abbildung 3 zeigt die N-Aufnahmen der Versuchsvarianten in 2013/14 jeweils vor und nach dem Winter. Die Werte für die zwei Varianten Winterweizen wurden nur in den nach intensiver Bodenbearbeitung bestellten Parzellen geschnitten, da der Weizen in der Direktsaatvariante stets gleich weit entwickelt war. Nach der Rapsernte wurden die Versuchspartzen nicht gedüngt; der von den Folgekulturen aufgenommene Stickstoff entstammt der Mineralisation von organischem Boden-N und Ernteresten sowie der natürlichen Deposition.

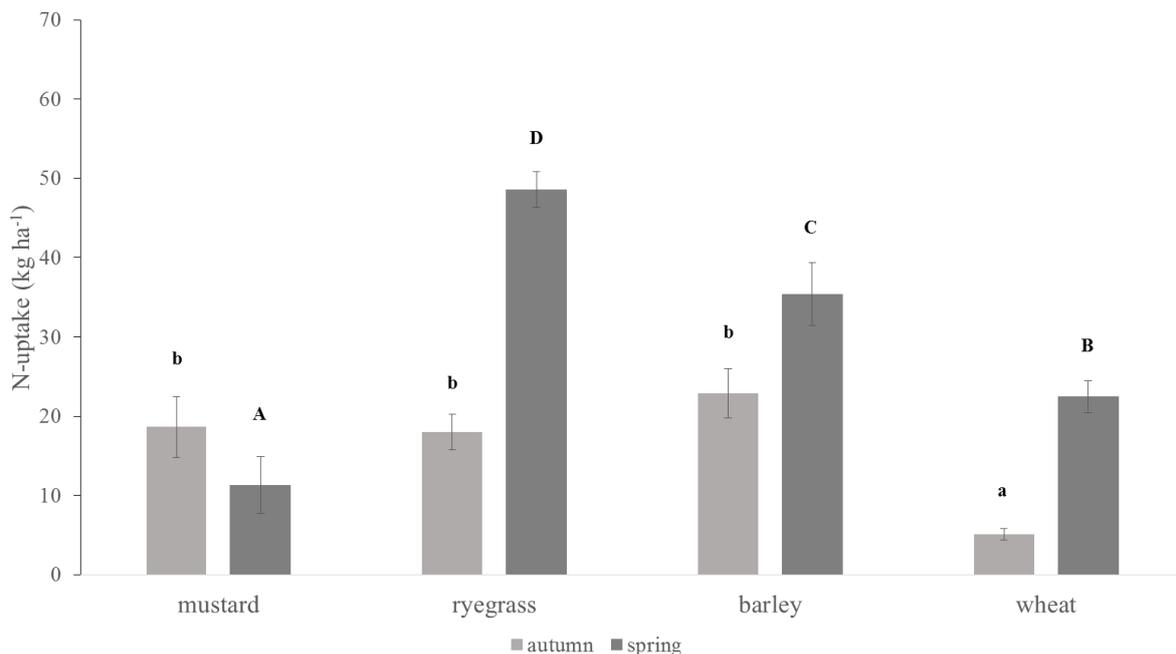


Abbildung 3: N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse in 2013/14, Tukey-Test für $\alpha = 0,05$

Gelbsenf als einzige nicht winterharte Nachfrucht hatte nach Winter zum Schnitttermin Mitte März 2014 weniger Stickstoff in der Biomasse gebunden, als vor der Vegetationsruhe Mitte November 2013. Die übrigen Kulturen wuchsen über Winter weiter, was an der hohen N-Aufnahme von bis zu 49 kg ha⁻¹ im Weidelgras ausgangs Winter zu sehen ist. Dabei muss man berücksichtigen, dass das Weidelgras vor der Vegetationsruhe bereits einmal geschnitten wurde und während des Winters nachgewachsen ist. Addiert man beide Schnitte, beträgt die Gesamt-N-Aufnahme ca. 70 kg ha⁻¹. Während die Wintergerste vor Vegetationsende noch bis in die Mitte der Bestockung kam, bildete Winterweizen lediglich drei bis vier Blätter aus.

Im zweiten Versuchsjahr (Abbildung 4) hat sich der Gelbsenf besser entwickelt (N-Entzug: 37 kg ha⁻¹). Bis Mitte März reduzierte sich der in der pflanzlichen Biomasse gebundene Stickstoff um 10 kg ha⁻¹.

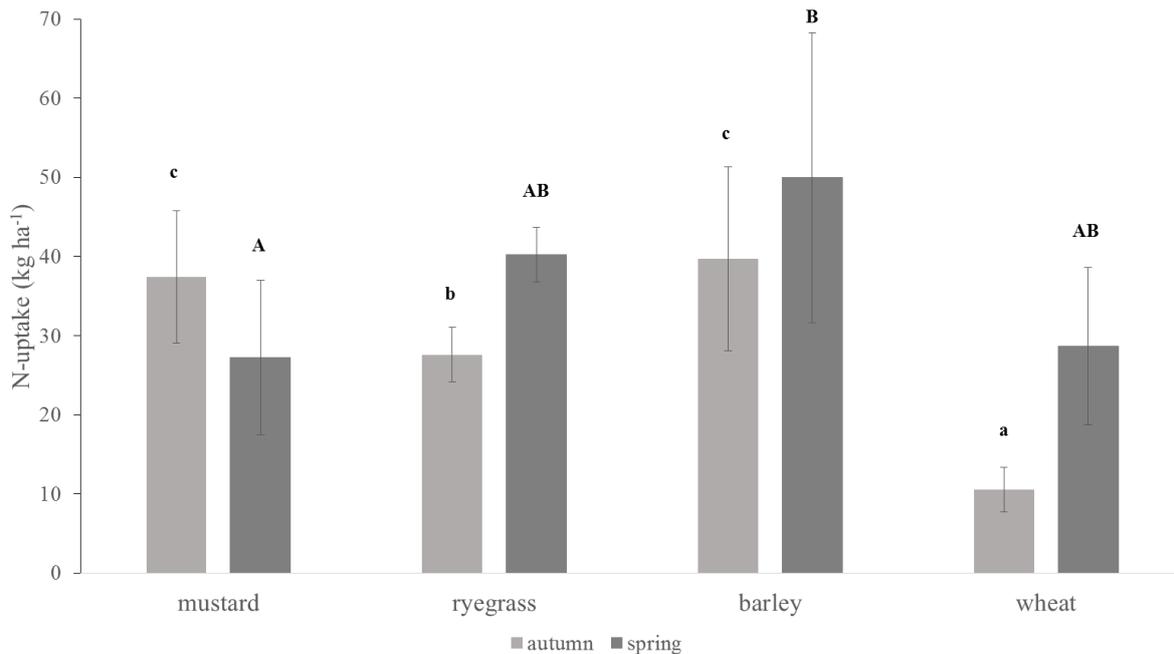


Abbildung 4: N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse in 2014/15, Tukey-Test für $\alpha = 0,05$

Im Herbst 2014 hat Wintergerste tendenziell sogar mehr Stickstoff gebunden als Weidelgras; die geringste N-Aufnahme wurde bei Winterweizen festgestellt.

3.1.2 N₂O-Flüsse und kumulierte N₂O-Emissionen

Mit den N₂O-Messungen wurde in beiden Jahren unmittelbar nach der Rapsernte Mitte August bzw. Ende Juli begonnen. Dabei waren Sommer und Herbst 2013 von ausgeprägter Trockenheit gekennzeichnet, 2014 traten deutlich höhere Niederschläge auf. Beide Winter waren niederschlagsarm, die Bedingungen für hohe N₂O-Emissionen waren somit selten gegeben.

Bei Winterweizen und Wintergerste traten keine hohen N₂O-Emissionspeaks auf. Die höchsten N₂O-Emissionen waren in 2013 tendenziell noch am Beginn der Messreihe auszumachen (vor der Getreideaussaat), als sich beide Varianten in ihrer Bearbeitung nicht voneinander unterschieden (Zeitraum „bare soil“, siehe Abbildung 5). Infolge der geringen Temperaturen im Herbst und Winter lagen die Emissionen auf niedrigem Niveau, wobei Wintergerste eine leichte Tendenz zu höheren N₂O-Emissionen zeigte.

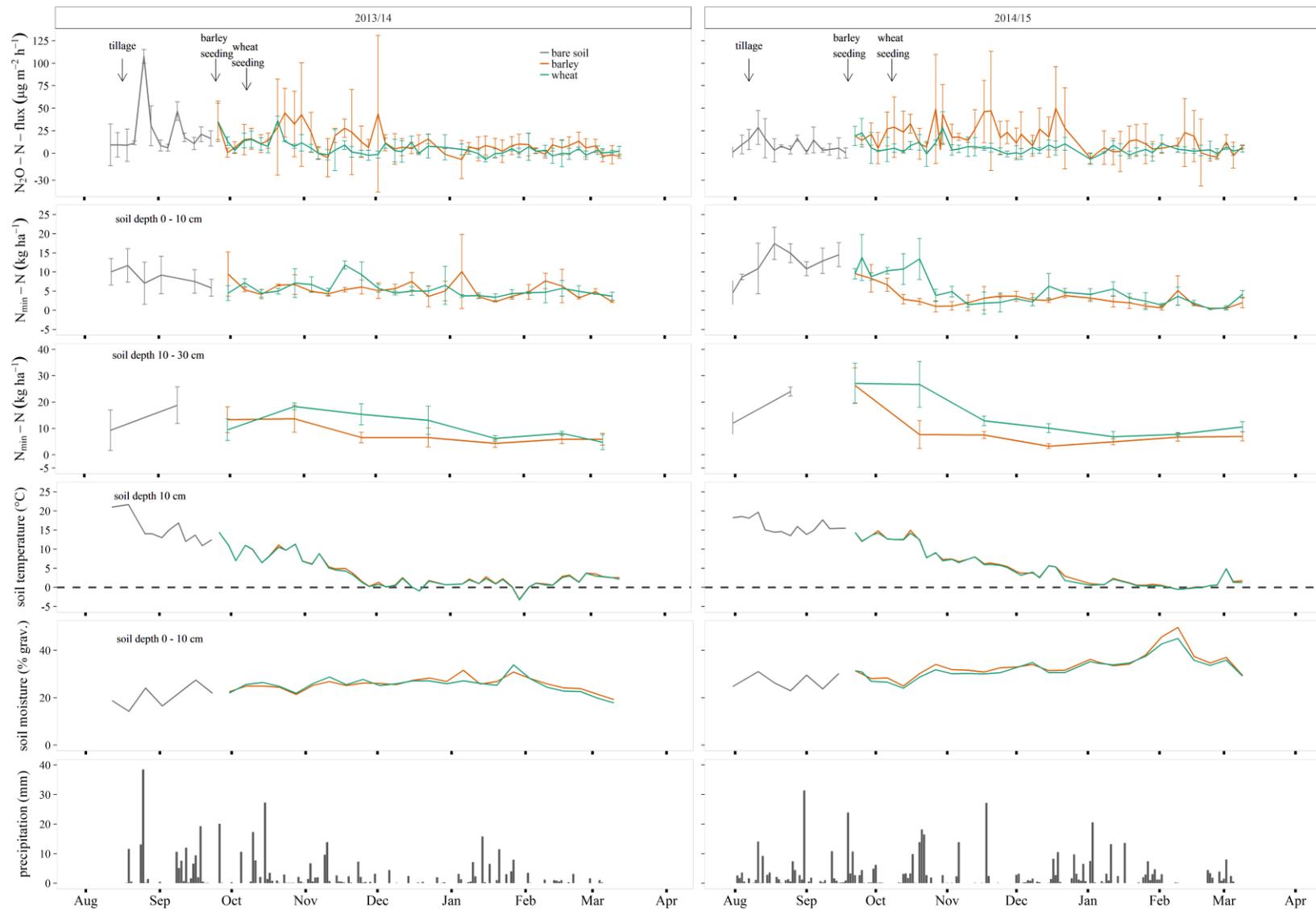


Abbildung 5: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau von Winterweizen und Wintergerste nach Winterraps

Ausgeprägter war dieser Trend bei den N_2O -Emissionen in der zweiten Messsaison 2014/15 trotz höherer N-Aufnahmen vor Winter bei Wintergerste. Das war unerwartet, weil auch die N_{min} -Werte für Gerste niedriger als für Weizen lagen. Die kumulierten N_2O -Emissionen nach Winterraps unter Winterweizen waren signifikant niedriger ($0,47 \text{ kg ha}^{-1}$ in 2013/14 bzw. $0,32 \text{ kg ha}^{-1}$ in 2014/15) als die N_2O -Emissionen unter Wintergerste ($0,72 \text{ kg ha}^{-1}$ bzw. $0,77 \text{ kg ha}^{-1}$, Abbildung 6).

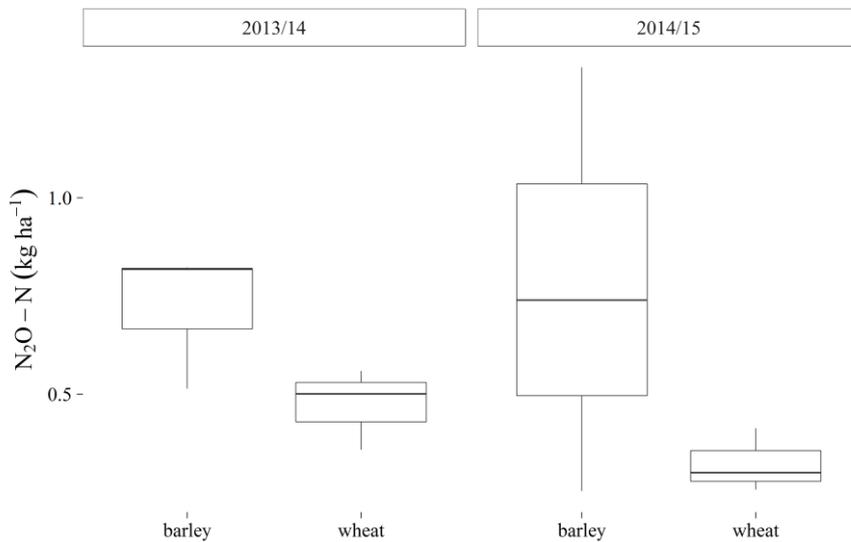


Abbildung 6: Kumulierte N_2O -Emissionen unter Gerste und Weizen nach Raps

Eine differenzierte Bodenbearbeitungsintensität nach Winterraps hatte relativ geringen Einfluss auf die Stickstoffdynamik und die N_2O -Emissionen (Abbildung 7). Weder die N_2O -Emissionen, noch die N_{min} -Werte unterschieden sich bei konventioneller Bodenbearbeitung und Direktsaat. Auch im zweiten Versuchsjahr mit hohen N_{min} -Gehalten im Boden bis zum Jahresende führte nicht zu höheren N_2O -Emissionen als im Vorjahr.

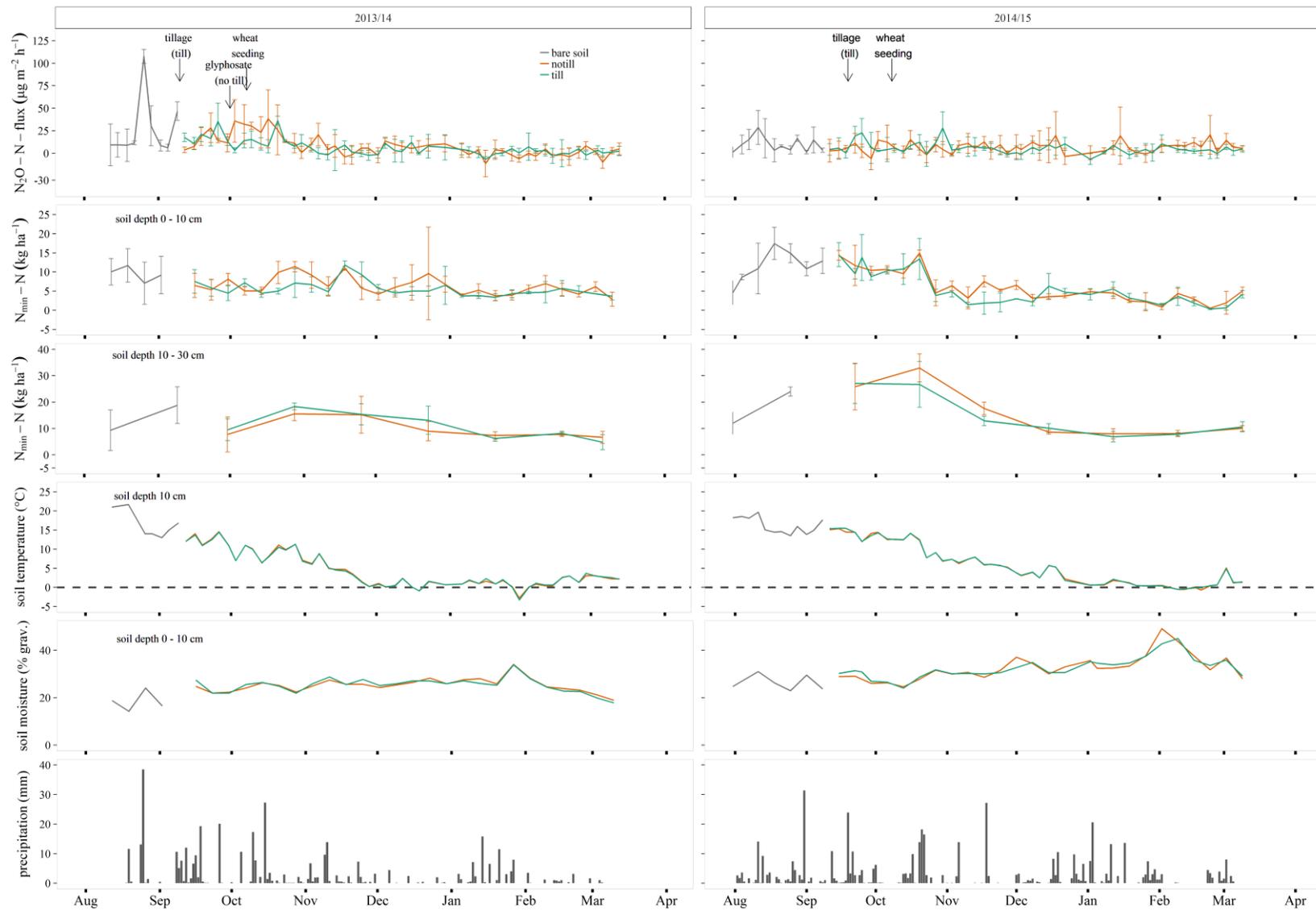


Abbildung 7: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau von Rapsweizen unter differenzierter Bodenbearbeitung

Für die kumulierten N_2O -Emissionen (Abbildung 8) bedeutete das teilweise die niedrigsten Emissionen der geprüften Versuchsvarianten. Mit 0,47 bzw. 0,32 $kg\ ha^{-1}$ nach intensiver Bodenbearbeitung und 0,51 und 0,37 $kg\ ha^{-1}$ N_2O-N in 2013/14 und 2014/15 unterschieden sich beide Varianten nicht signifikant voneinander.



Abbildung 8: Kumulierte N_2O -Emissionen unter Rapsweizen bei differenzierter Bodenbearbeitung

Bei den Zwischenfrüchten Senf und Weidelgras (Abbildung 9) traten die im Versuch niedrigsten N_{min} -Vorräte in beiden Bodenschichten (0 – 10 cm und 10 – 30 cm) auf. Mit Ausnahme des Weidelgrases im ersten Jahr waren auch die N_2O -Emissionen niedriger als in den anderen Versuchsvarianten.

Weidelgras zeigte im Jahr 2013/14 in zwei der drei Wiederholungen allerdings sehr hohe Emissionen. Fehler in der Versuchsdurchführung und bei der Probennahme können ausgeschlossen werden. Mögliche Ursachen sind kleinräumige Bodenunterschiede (z.B. Bodenverdichtungen als vorgegangener Bewirtschaftung) oder punktuell hohe Nährstoffeinträge durch Wildtiere.

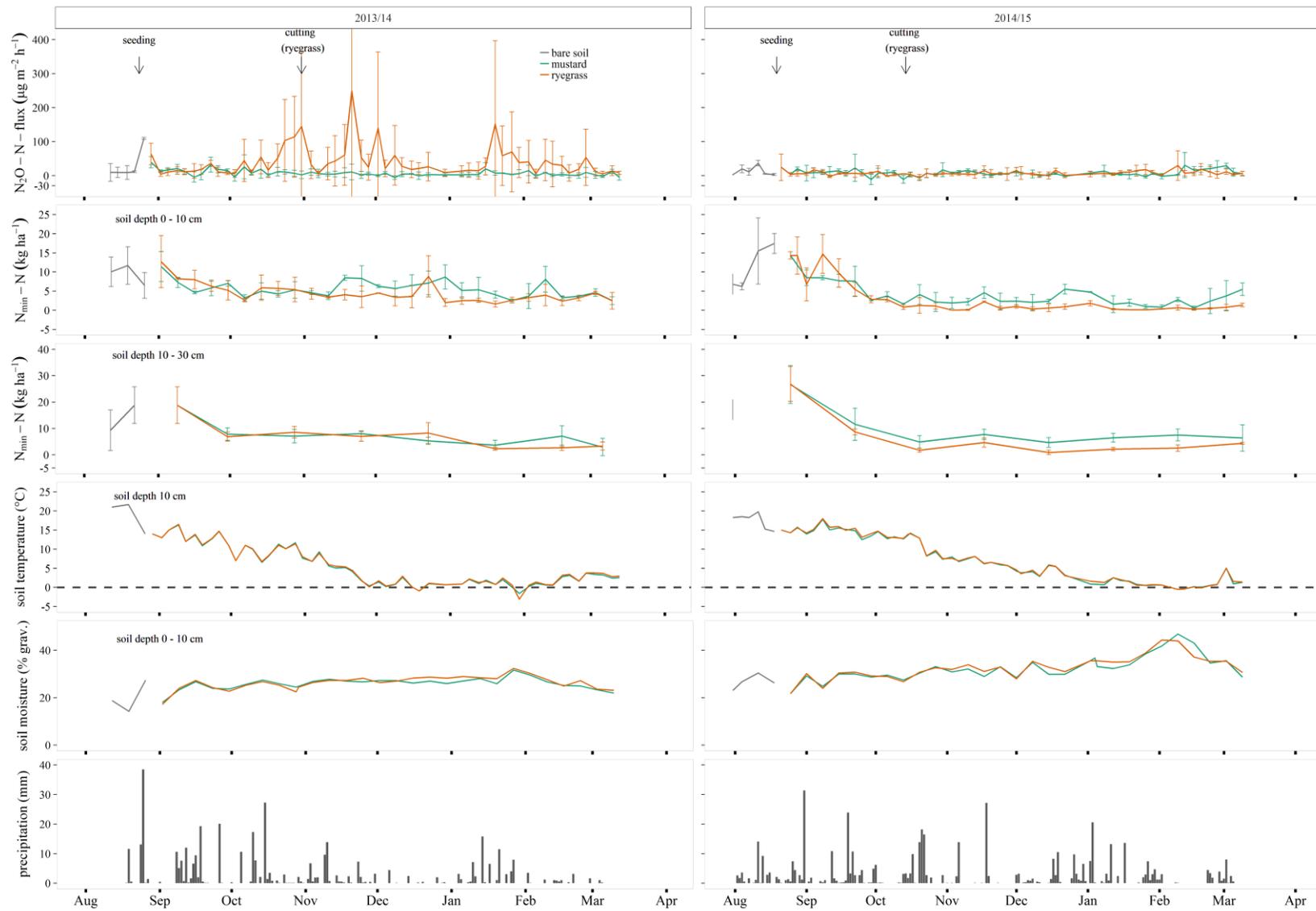


Abbildung 9: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag beim Anbau Senf und Weidelgras nach Raps

Aufgrund der Ausreißer in der N₂O-Emissionsdynamik waren keine signifikanten Unterschiede bei den kumulierten Emissionen zwischen beiden Varianten zu erkennen. Bei Senf betragen die N₂O-N-Emissionen 0,47 kg ha⁻¹ (2013/14) bzw. 0,44 kg ha⁻¹ (2014/15), bei Weidelgras 2,05 kg ha⁻¹ (2013/14) bzw. 0,42 kg ha⁻¹ (2014/15) (Abbildung 10).

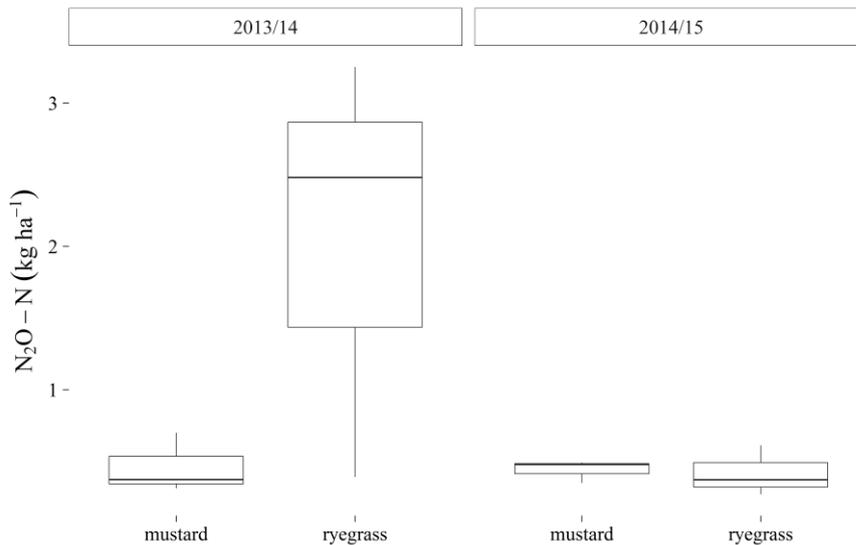


Abbildung 10: Kumulierte N₂O-Emissionen unter Senf und Weidelgras nach Raps

3.2 Versuche zur Rapsdüngung

Kornerträge von 20 bis 30 dt ha⁻¹ in der ungedüngten und bis zu 65 dt ha⁻¹ in den hoch gedüngten Varianten mit 280 kg ha⁻¹ Stickstoff spiegeln das hohe Niveau der Parzellenversuche wider. In der Praxis liegen die Erträge mindestens um 10 bis 15 Prozent niedriger.

3.2.1 Einfluss der N-Menge auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N₂O-Emissionen

Als Vergleichsvarianten dienen die ungedüngte Kontrolle (0/0/0) und die Variante mit praxisüblicher N-Düngung (0/120/60) mit relativ hohen N-Gaben zu Vegetationsbeginn im Frühjahr.

Bei der N-Aufnahme (Abbildung 11) zeigt sich, dass Raps in kurzer Zeit in der Lage ist, hohe Stickstoffmengen von über 250 kg ha⁻¹ aufzunehmen. Allerdings verringert sich diese Menge zur Abreife hin durch Blattfall wieder, was zu einem erneuten N-Eintrag bereits vor der Ernte führen kann. Dieser N-Verlust ist in der ungedüngten Kontrolle in beiden Versuchsjahren nicht sichtbar.

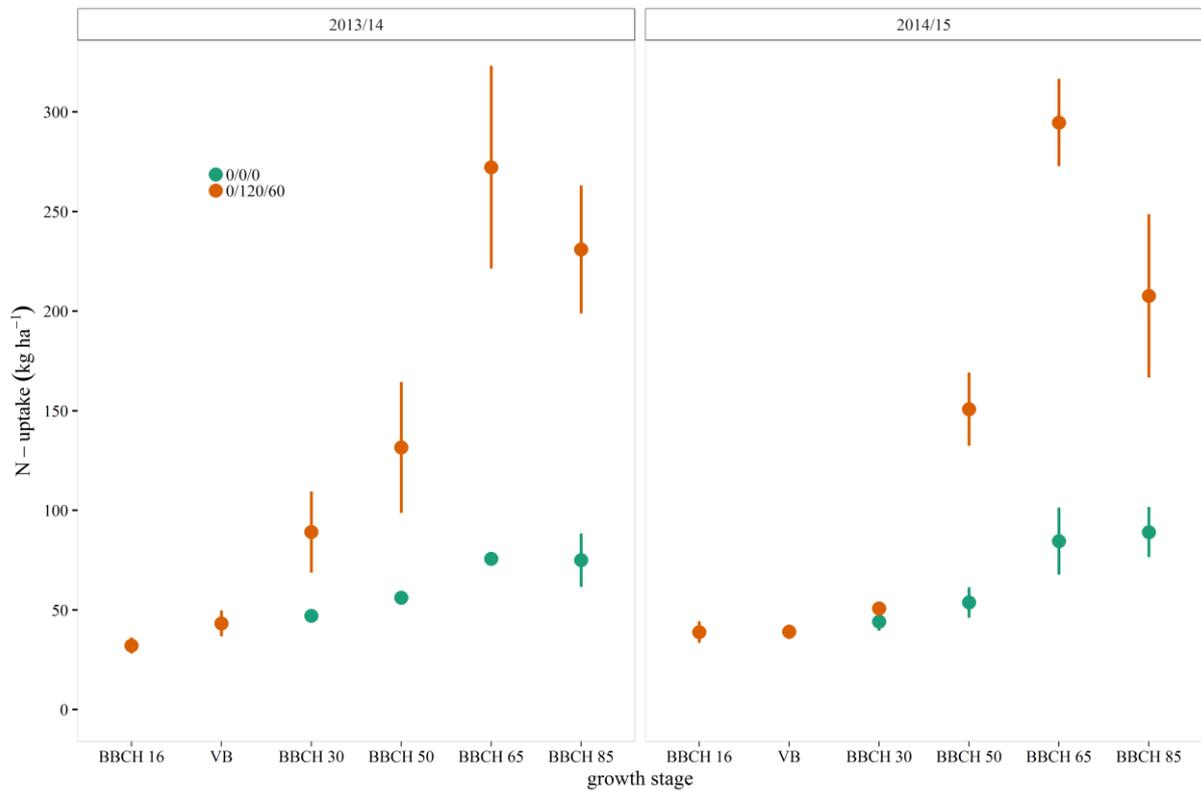
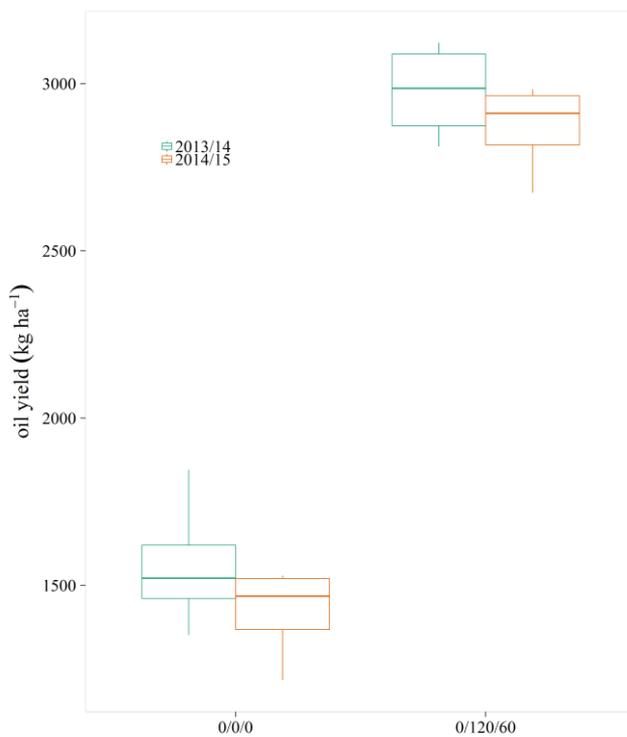


Abbildung 11: N-Aufnahme Varianten (0/0/0) und (0/120/60)

Im Versuchsjahr 2013/14 wurden tendenziell (nicht signifikant) höhere Erträge als 2014/15 erzielt (Abbildung 12). Das Ertragsniveau ist standortbedingt sehr hoch; bereits in der ungedüngten Kontrolle konnten Ölerträge von 1500 kg ha⁻¹ erzielt werden.



11

Abbildung 12: Ölertrag für die Varianten 0/0/0 und 0/120/60

Mit einem N-Saldo ca. 20 kg ha⁻¹ war die N-Bilanz (N-Zufuhr durch Düngung abzüglich N-Abfuhr durch das Korn) in der Variante 0/120/60 in beiden Jahren sehr ausgeglichen, in der Kontrolle dagegen extrem niedrig (Abbildung 13). Das verdeutlicht, welches Potential zur N-Aufnahme Winterraps innerhalb der Fruchtfolge hat.

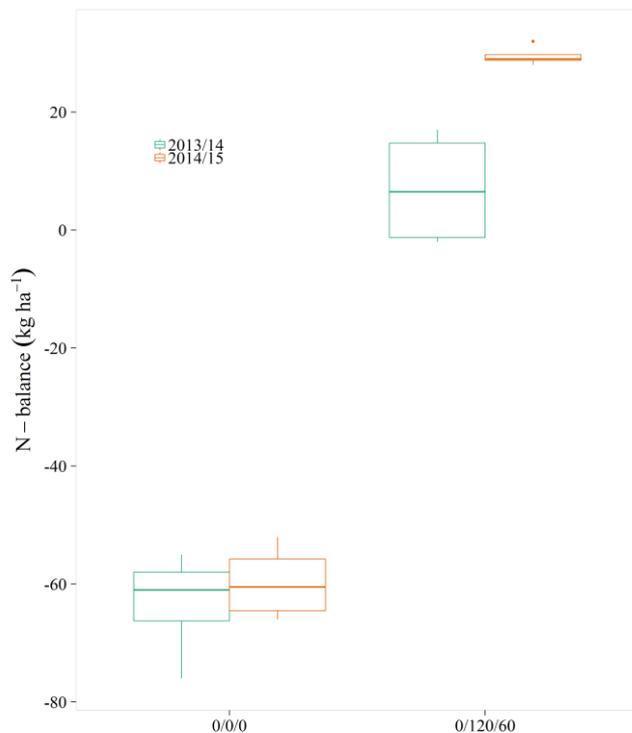


Abbildung 13: N-Bilanz für die Varianten 0/0/0 und 0/120/60.

Bei der Betrachtung der N₂O-Dynamik fällt die Übereinstimmung von Emissionspeaks und hohen Niederschlagsmengen auf (Abbildung 14). Hohe Niederschlagsmengen können zu einer kurzfristigen Wassersättigung und Luftarmut im Boden führen, was die N₂O-Bildung begünstigt. In beiden Jahren gibt es besonders hohe N₂O-Peaks nach der Rapsblüte zur Zeit des ersten Blattfalls (obwohl dies nicht an den N_{min}-Werten erkennbar ist) und im Jahr 2014 aufgrund der hohen Niederschläge im Juni und Juli auch zur Abreife des gedüngten Rapsbestandes. Die N_{min}-Vorräte der gedüngten Variante sind nach der Frühjahrsdüngung über mehrere Wochen in der obersten Bodenschicht (0 - 10 cm) höher als in der ungedüngten Variante. In der Bodenschicht 10 - 30 cm ist fast keine Beeinflussung durch die N-Düngung (besonders nicht beim Nitrat) sichtbar. Auch die N_{min}-Werte der beiden Varianten unterscheiden sich bis auf einen Zeitraum von ca. sechs Wochen nach der Düngung nicht, was wiederum das hohe N-Aufnahmepotential des Winterrapses widerspiegelt.

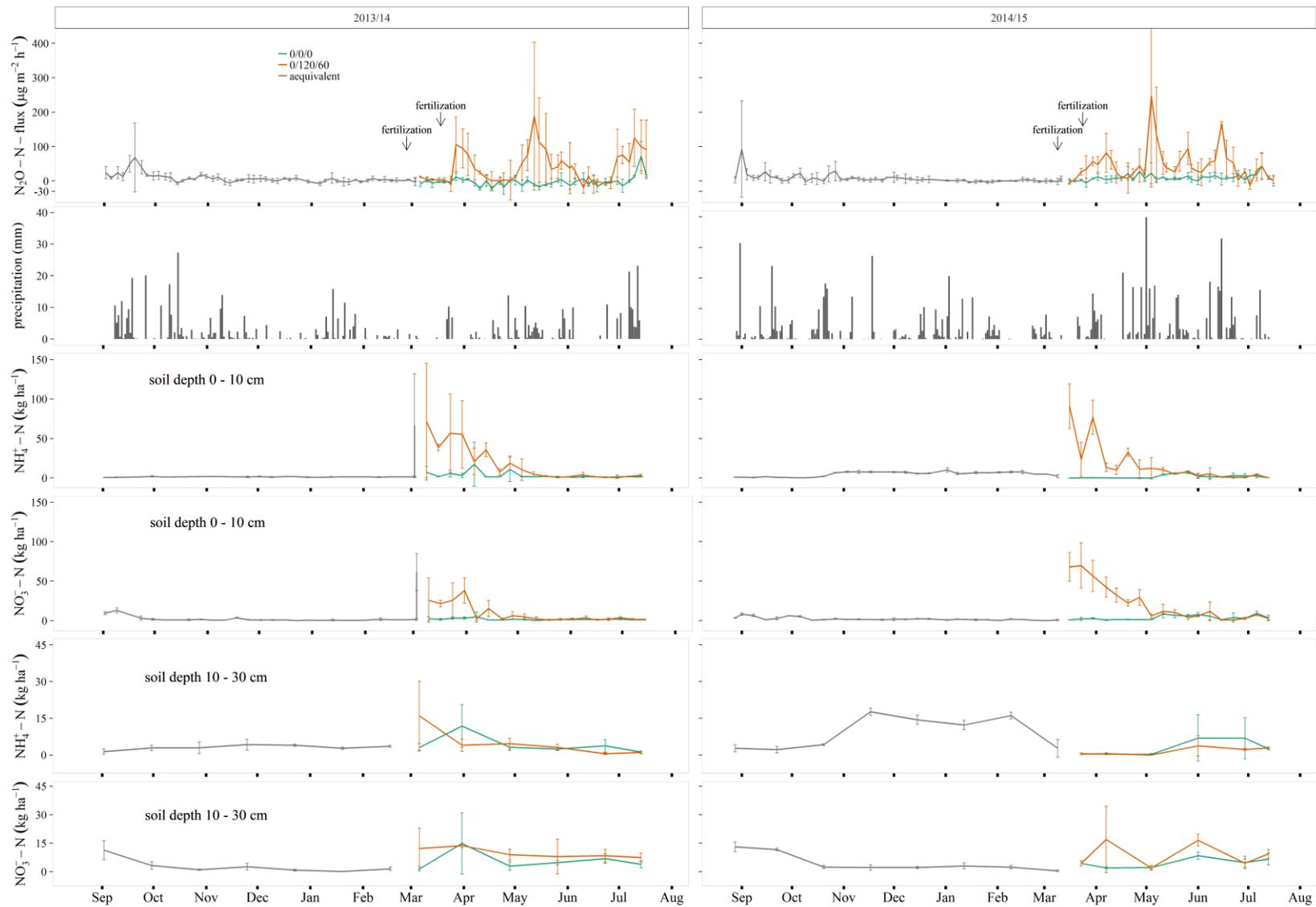


Abbildung 14: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/0/0 und 0/120/60

3.2.2 Wirkung einer N-Steigerung auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N₂O-Emissionen

Bei der höchstgedüngten Variante (40/120/120) (Abbildung 15) wurden N-Aufnahmen von über 350 kg ha⁻¹ (EC 65) ermittelt. Die in der Biomasse gebundene N-Menge kann sich bis kurz vor der Abreife aber auch wieder um 100 kg ha⁻¹ reduzieren (Jahr 2014).

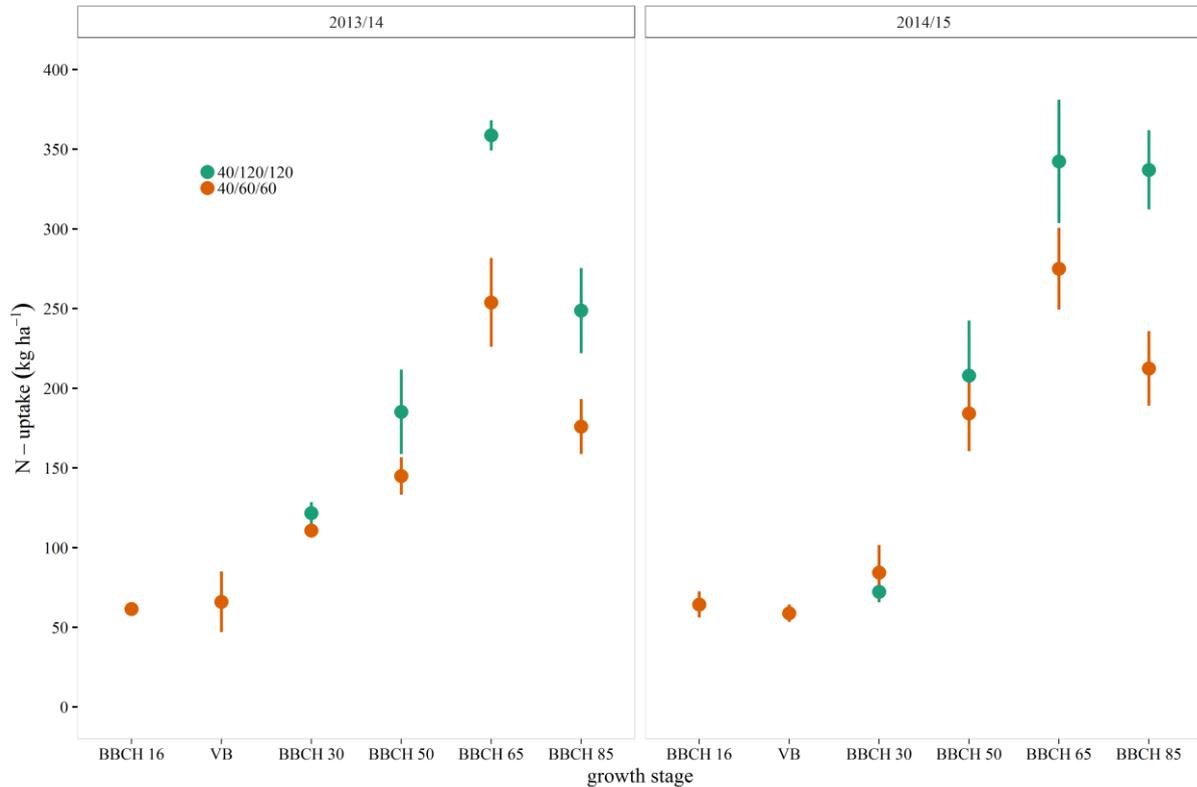


Abbildung 15: N-Aufnahme in den Varianten 40/60/60 und 40/120/120

Bedingt durch niedrigere Ölgehalte bei steigender N-Düngung weist die Variante zwar höhere Ölerträge als die Variante 40/60/60 auf, allerdings im Hohertragsjahr 2013/14 nicht mehr statistisch voneinander absicherbar (Abbildung 16).

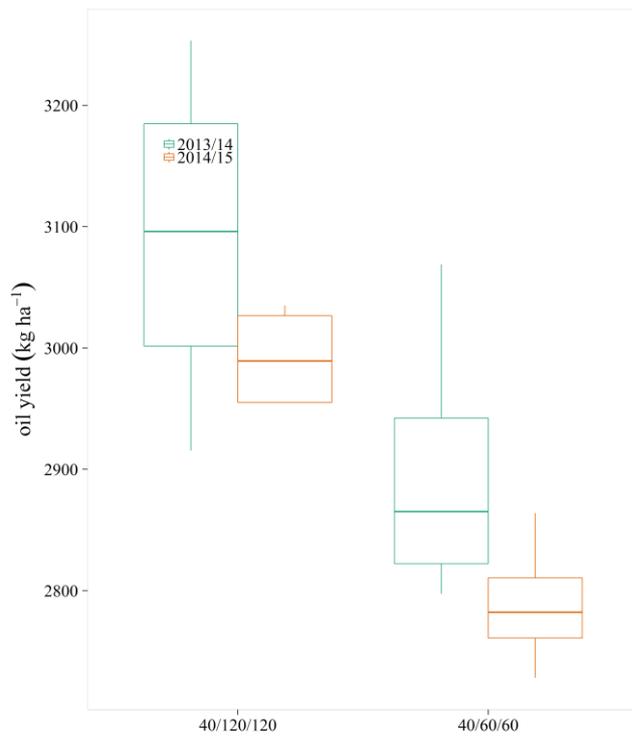


Abbildung 16: Ölerträge für die Varianten 40/60/60 und 40/120/120

Wegen des niedrigeren Ertragsniveaus in 2014/15 übertrifft der N-Saldo der hoch gedüngten Variante 40/120/120 die Variante 40/60/60 deutlich (Abbildung 17).

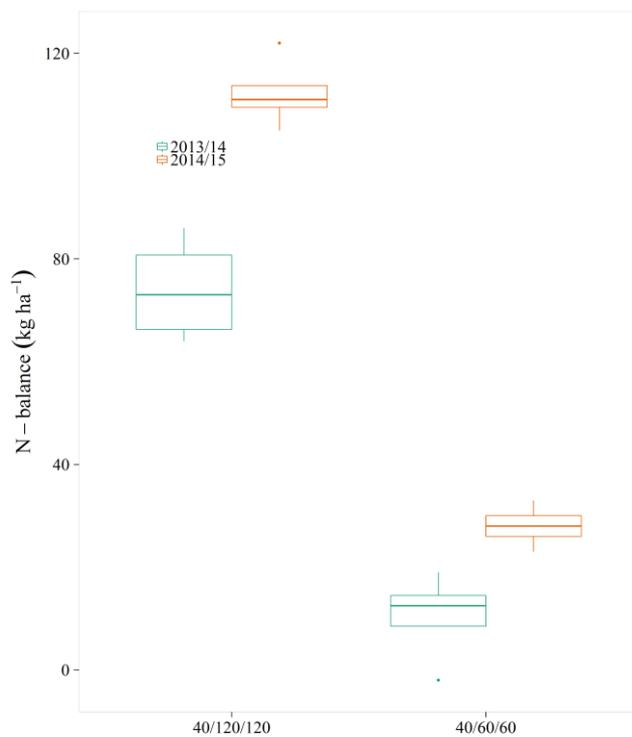


Abbildung 17: N-Saldo für die Varianten 40/60/60 und 40/120/120

Während sich die N₂O-Emissionen beider Varianten im ersten Untersuchungszeitraum bis auf die Zeit der Abreife nicht unterschieden, emittierten die hoch gedüngten Parzellen in der zweiten Messsaison fast permanent deutlich höhere N₂O-Mengen (Abbildung 18). Die N₂O-Peaks in der Phase der Abreife fehlten hier allerdings aufgrund der heißen und trockenen Witterung.

Auffällig sind die Nitratwerte in beiden Bodenschichten, die in der Variante 40/120/120 selbst während der Zeiten mit der höchsten N-Aufnahme zur Blüte höher waren und auf ein höheres N-Verlustpotential schließen lassen.

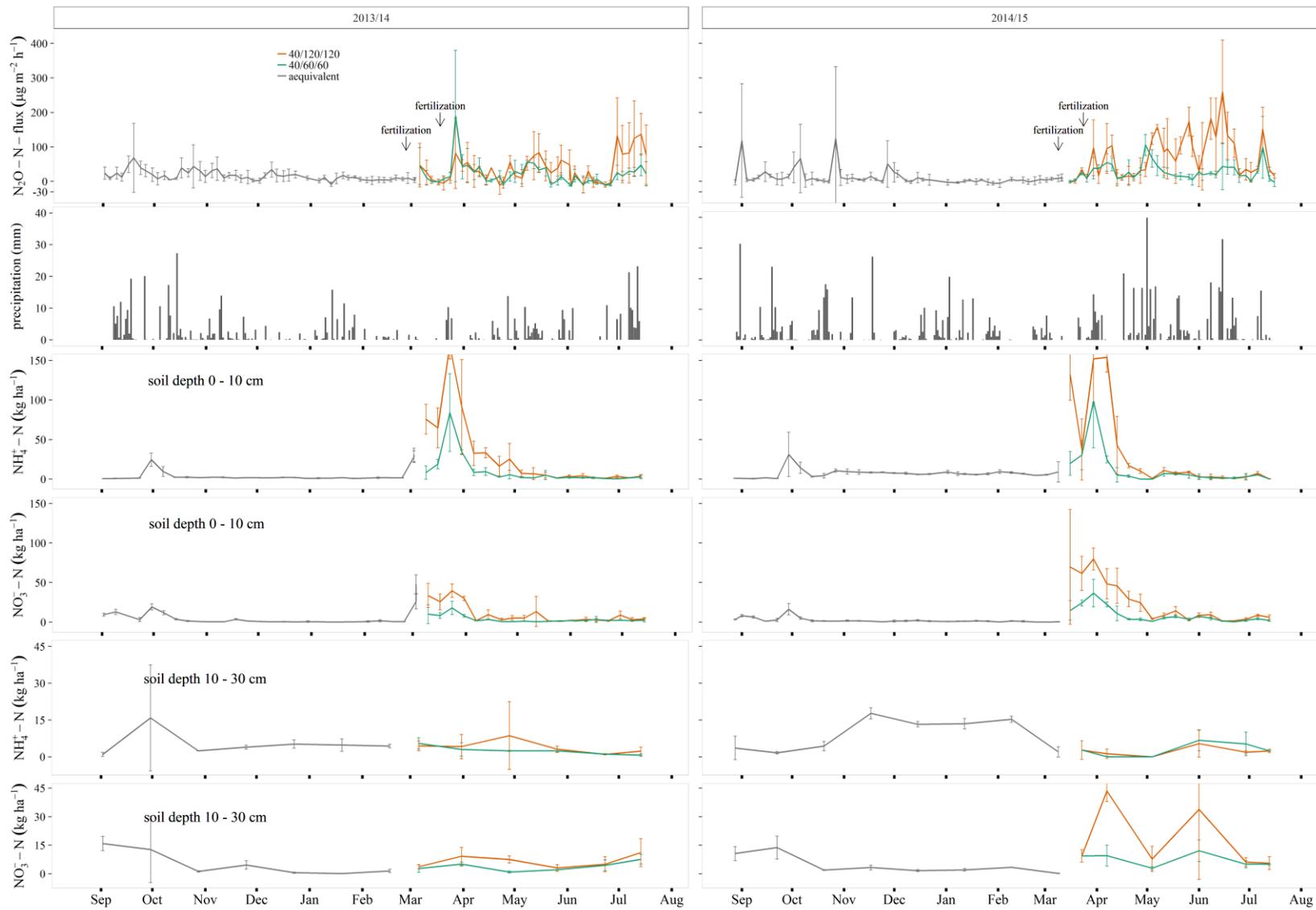


Abbildung 18: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/60/60 und 40/120/120

3.2.3 Wirkung der Herbst-N-Düngung auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N₂O-Emissionen

Eine im Rapsanbau verbreitete Praxis ist die N-Düngung der Bestände bereits im Herbst. Hierzu werden die Varianten 0/120/60 und 40/120/60 mit demselben N-Düngeregime ab Vegetationsbeginn miteinander verglichen. Bei Herbst-N-Düngung (40 kg ha⁻¹) wurden in beiden Versuchsjahren im Herbst ca. 30 kg ha⁻¹ mehr aufgenommen. Über die gesamte Vegetationszeit hatten die im Herbst gedüngten Bestände mehr Stickstoff im Aufwuchs gebunden (Abbildung 19). Die Dynamik der N-Aufnahme im Frühjahr ist dabei von der Herbstdüngung unbeeinflusst geblieben.

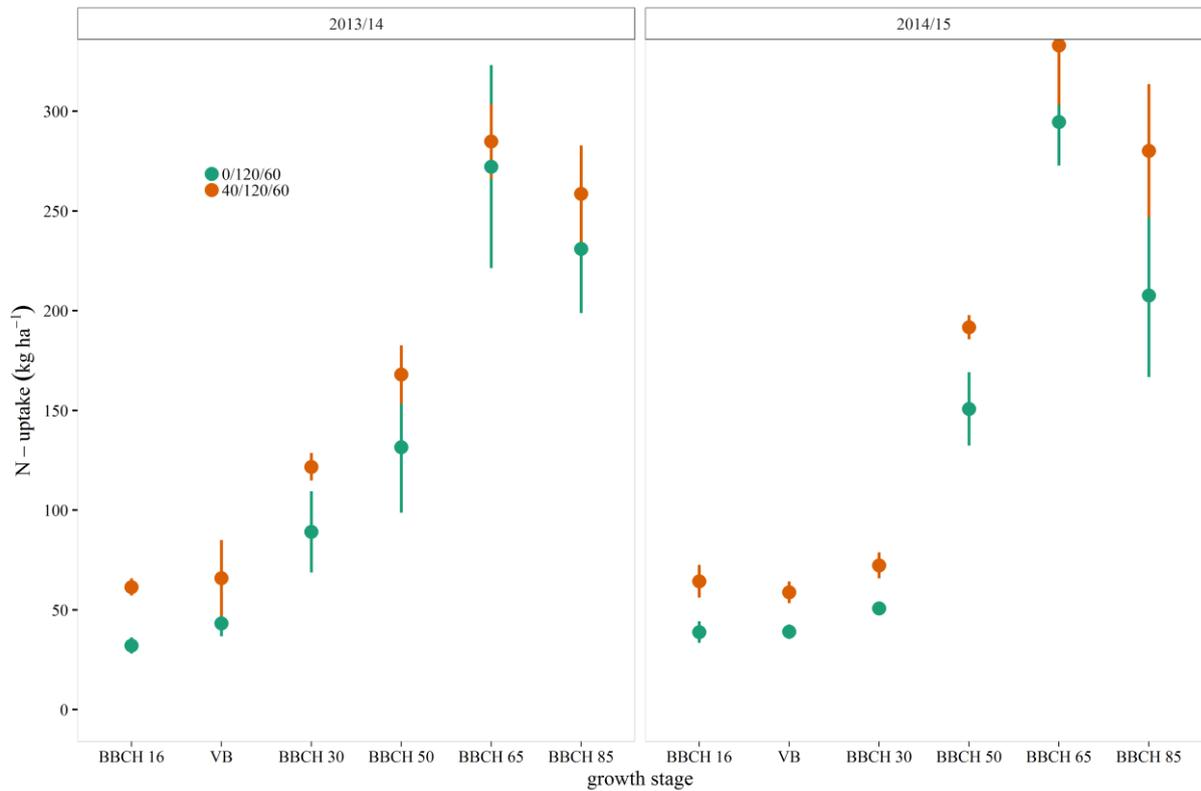


Abbildung 19: N-Aufnahme in den Varianten 0/120/60 und 40/120/60

Die Ölerträge waren in der Variante mit Herbstdüngung letztlich nur tendenziell erhöht (Abbildung 20), was den Effekt dieser Maßnahme in Frage stellt.

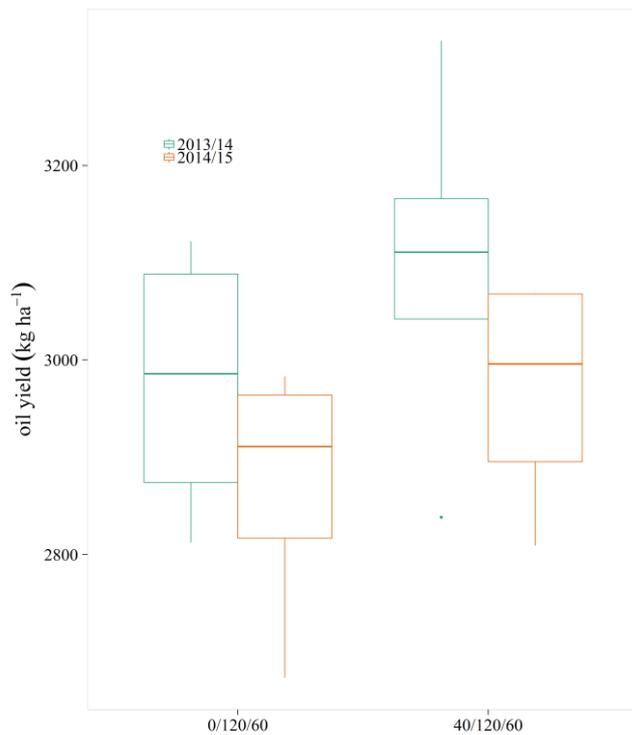


Abbildung 20: Ölerträge für die Varianten 0/120/60 und 40/120/60

Bei den N-Bilanzen zeigte sich in beiden Jahren, dass – obwohl 30 kg ha⁻¹ der gedüngten 40 kg ha⁻¹ Stickstoff bis kurz vor der Abreife in der Biomasse wiederzufinden waren – diese N-Menge nicht mit dem Korn abgefahren wurde, sondern auf dem Schlag verblieb (Abbildung 21).

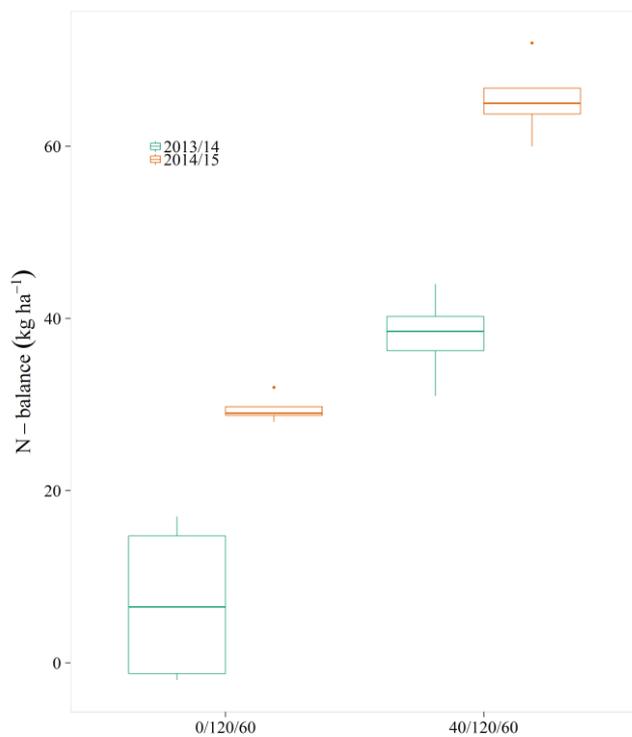


Abbildung 21: N-Salden für die Varianten 0/120/60 und 40/120/60

Die im Herbst gedüngte Variante emittiert bis zum Vegetationsbeginn mehr N_2O als die Variante 0/120/60 – wenn auch auf geringem Niveau. Danach emittieren die Parzellen mit Herbstdüngung weniger N_2O als die im Herbst ungedüngten (Abbildung 22).

Die N_{\min} -Werte zeigen vor allem beim Nitrat in beiden Jahren im Frühjahr in allen Tiefen niedrigere Werte bei der Variante 40/120/60, was sich in den bereits vorher erwähnten niedrigeren N_2O -Emissionen niederschlägt und durch die bei gedüngten Pflanzen weiter entwickelten Wurzeln begründet werden kann. Die Herbstdüngung führte bis zum Vegetationsbeginn nicht zu höheren N_{\min} -Werten unter dem Rapsbestand.

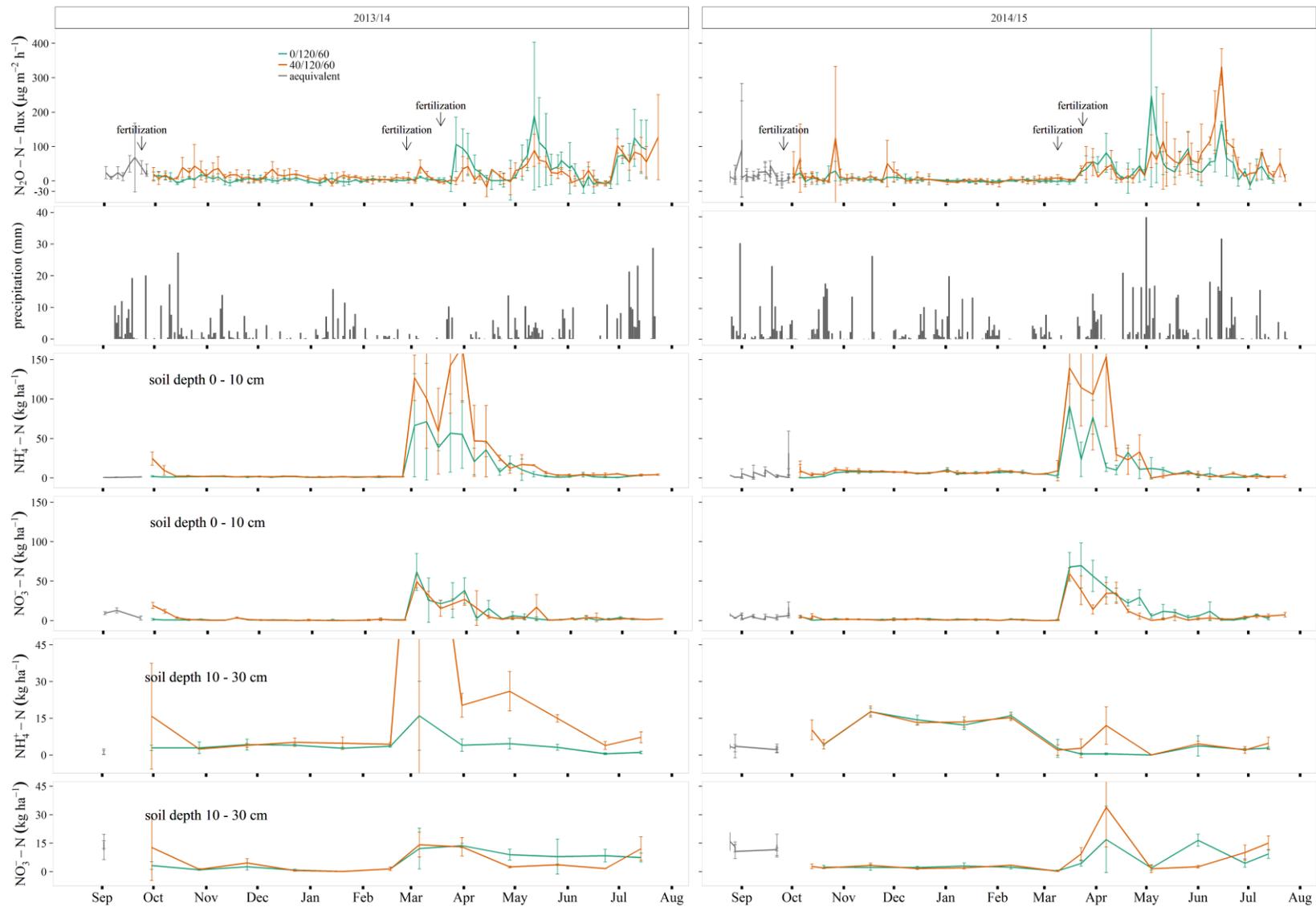


Abbildung 22: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/120/60 und 40/120/60

3.2.4 Wirkung der Terminierung der N-Düngung im Frühjahr auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N₂O-Emissionen

Bei unterschiedlicher Terminierung der Frühjahrs-N-Düngung bei gleicher Gesamthöhe der Düngung werden Effekte auf die N-Aufnahme sichtbar (Abbildung 23). Einen anfänglichen Rückstand in der N-Aufnahme holte die Variante 0/60/120 in beiden Versuchsjahren bis zur Blüte auf; zudem ging die N-Aufnahme in der Biomasse zur Abreife weniger deutlich zurück, als in der zu Vegetationsbeginn hoch gedüngten Variante.

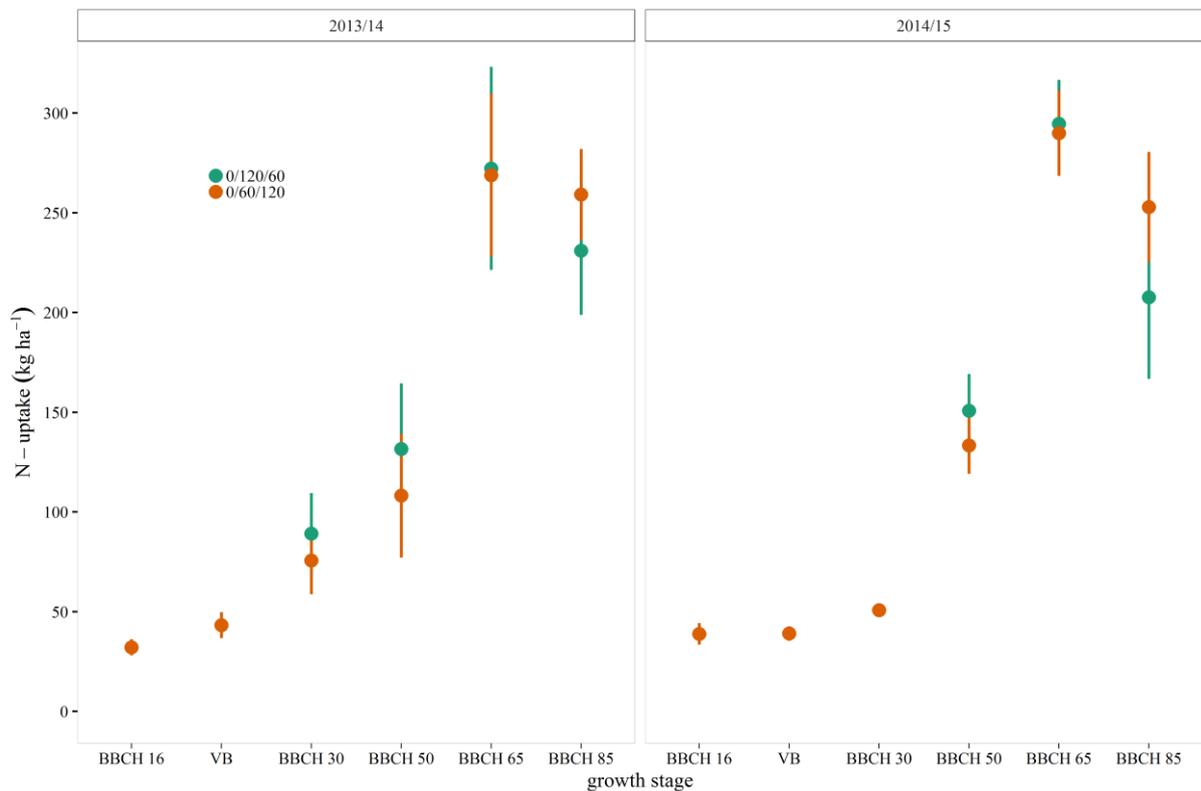


Abbildung 23: N-Aufnahme in der Variante 0/120/60 und 0/60/120

Zudem ergaben sich für die zu Vegetationsbeginn hoch gedüngte Variante keine Ertragsvorteile (Abbildung 24), besonders nicht bei weit entwickelten Beständen und günstiger Witterung, wie es in der Saison 2013/14 der Fall war.

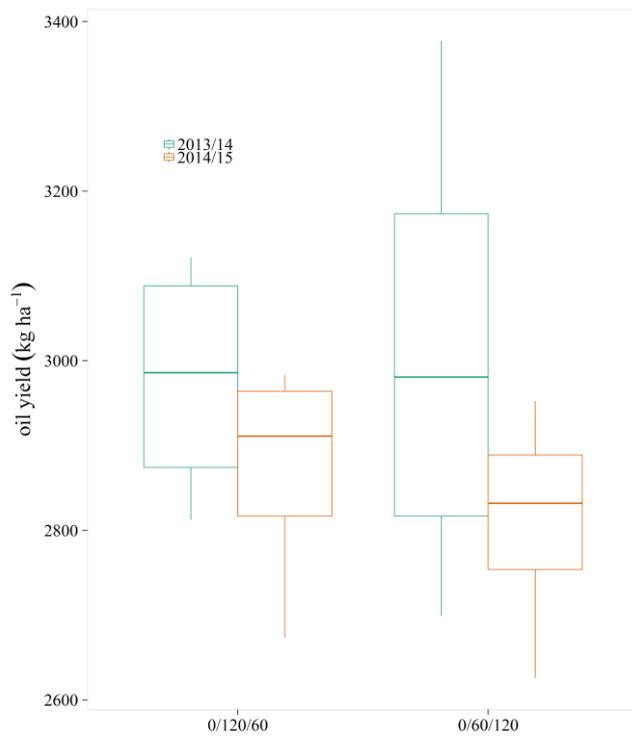


Abbildung 24: Ölerträge in den Varianten 0/120/60 und 0/60/120

In den N-Salden lagen beide Varianten gleichauf (Abbildung 25). Es treten aber deutliche Jahreseffekte auf.

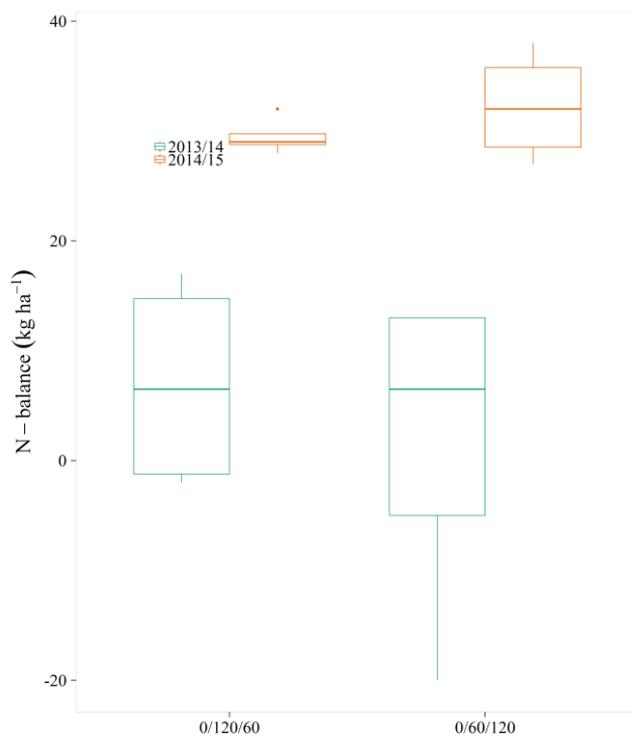


Abbildung 25: N-Bilanzen in den Varianten 0/120/60 und 0/60/120

Da beide Varianten in den Ertragsparametern dicht beieinander lagen, ließen sich in der N_{\min} -Dynamik auch keine entscheidenden Unterschiede identifizieren (Abbildung 26). Die N_2O -Emissionen in der zu Vegetationsbeginn - betonten N-Düngung waren allerdings vor allem in 2013/14 von Frühjahr weg bis zur Abreife teilweise deutlich erhöht. Bei hohen N-Düngermengen, noch niedriger N-Aufnahme durch den Pflanzenbestand sowie ungünstigen Witterungsbedingungen (Niederschlagsereignisse) kann es zu „ N_2O - Hot Spots“ gekommen sein.

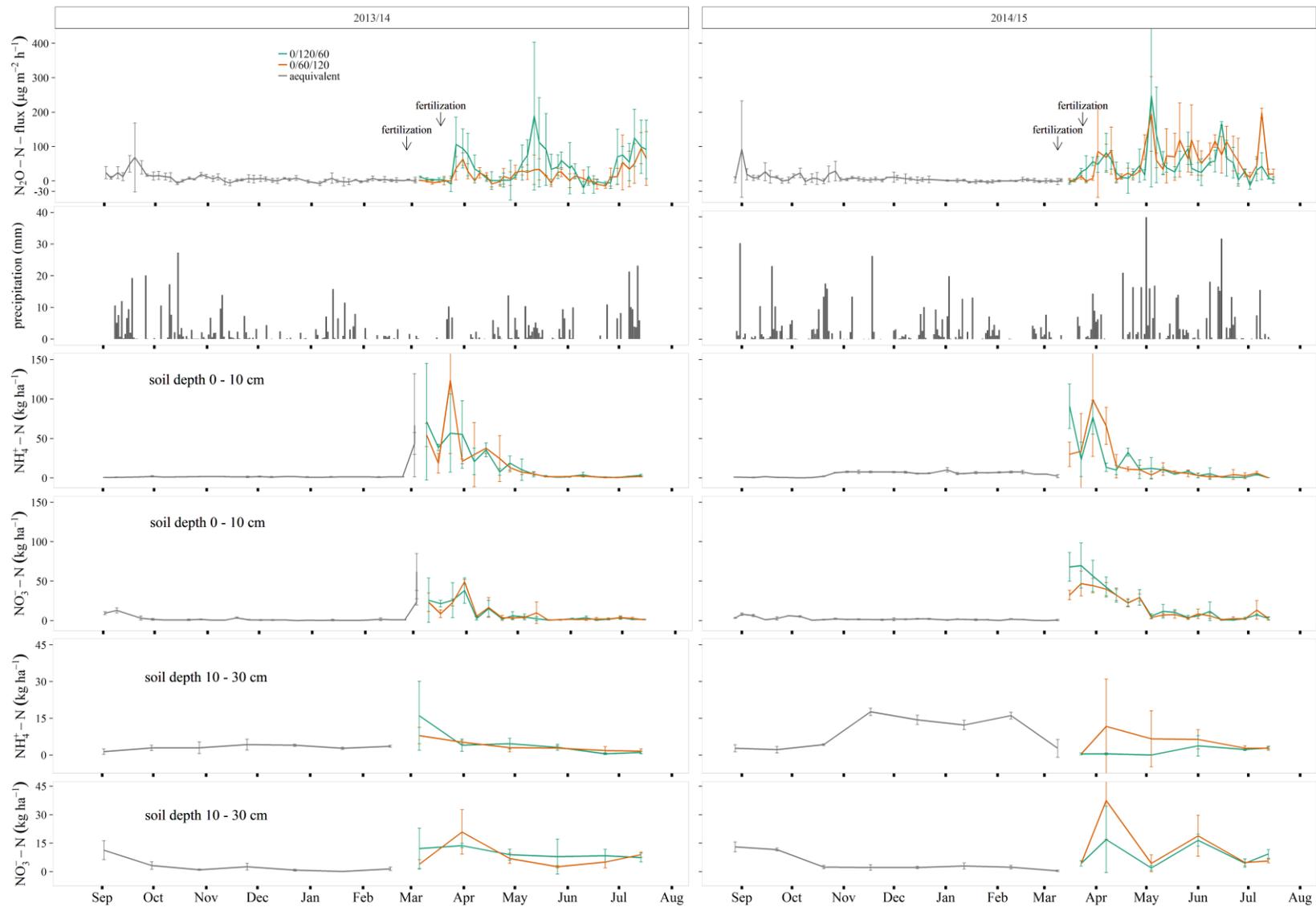


Abbildung 26: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 0/120/60 und 0/60/120

Noch deutlichere Terminierungseffekte bei der N-Aufnahme waren bei Einmalgaben großer N-Düngermengen (160 kg ha^{-1}) zu beobachten (Abbildung 27). Selbst hier ist die N-Aufnahme spätestens zur Blüte ungeachtet der Terminierung angeglichen. Die große Differenz zwischen beiden Varianten zu EC 85 im zweiten Jahr ist wahrscheinlich versuchstechnisch durch Pflanzenverluste begründet.

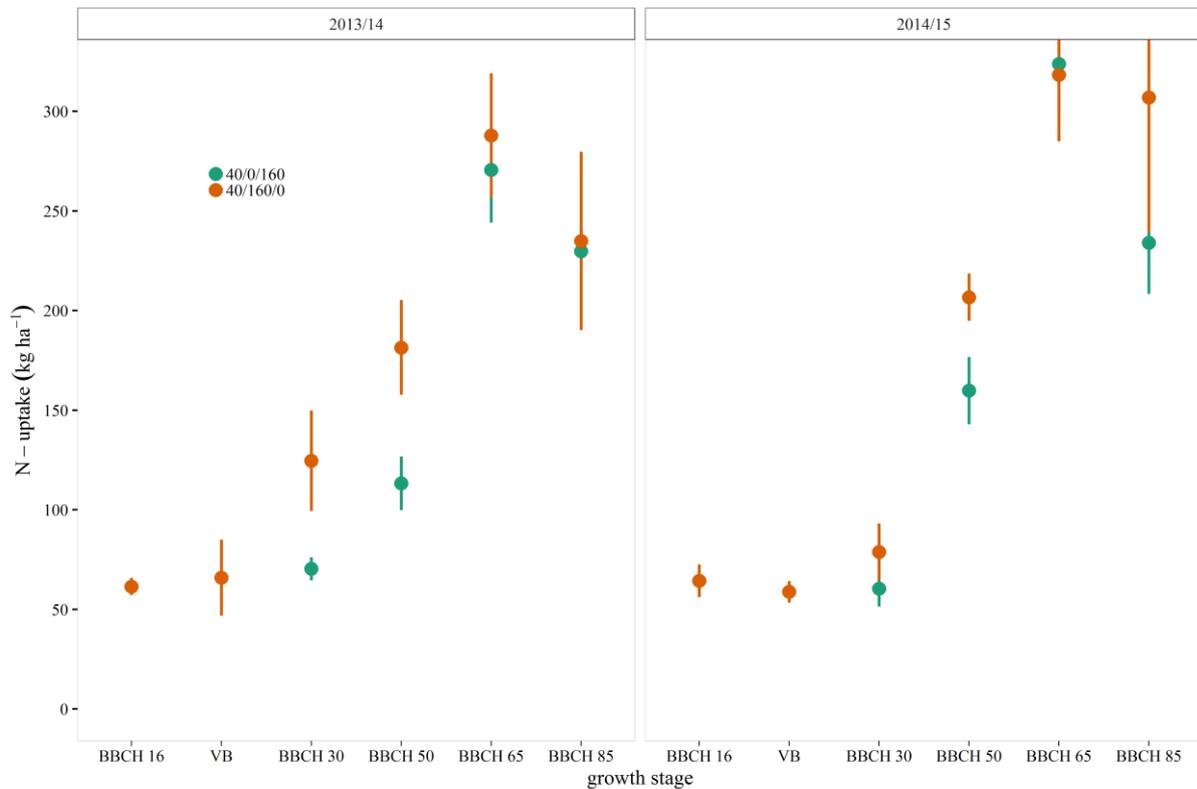


Abbildung 27: N-Aufnahme in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160

Bei den Ölerträgen (Abbildung 28) deuten sich leichte Vorteile für eine frühe Düngung an, allerdings lassen sich beide Varianten nicht statistisch voneinander unterscheiden.

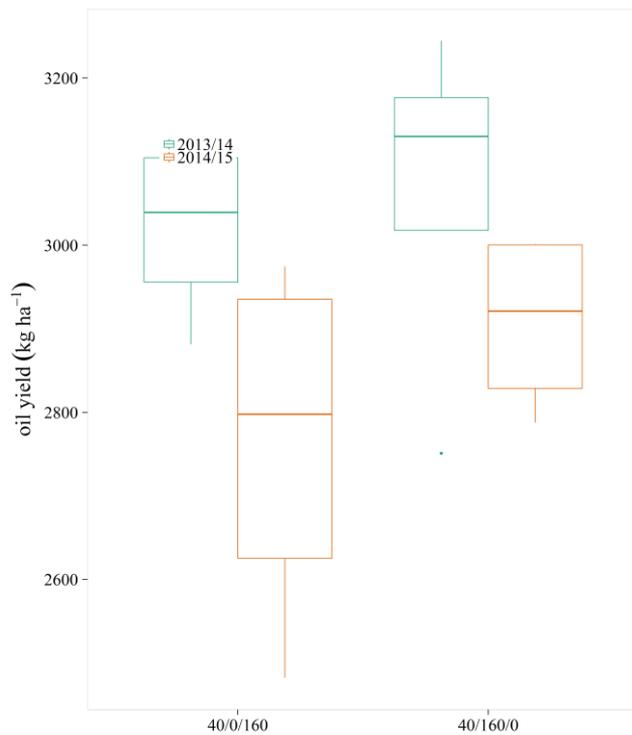


Abbildung 28: Ölertrag in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160

Ebenso ausgeglichen waren die N-Bilanzen beider Varianten, was auf ein sehr großes Kompensationspotential der Rapsbestände – auch in Hinblick auf eine verzögerte Wirkung von Düngungsgaben – hinweist (Abbildung 29).

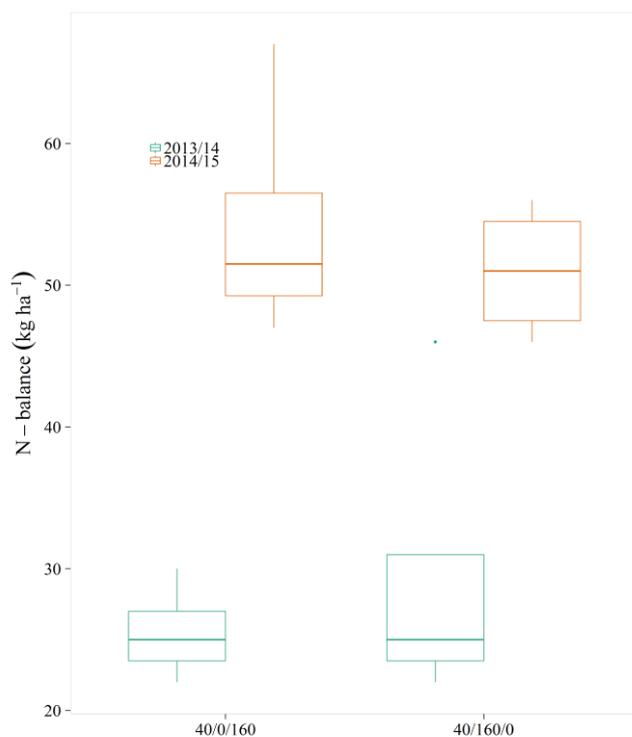


Abbildung 29: N-Bilanzen in den Varianten 40/160/0 und 40/0/160

Selbst in den Parametern N_{\min} -Vorrat und N_2O -Emissionen waren zwischen beiden Varianten keine konsistenten Unterschiede erkennbar; hier begünstigte die Witterung in 2014 die Variante mit früher hoher Andüngung, während es im zweiten Jahr eher umgekehrt zu sein schien (Abbildung 30).

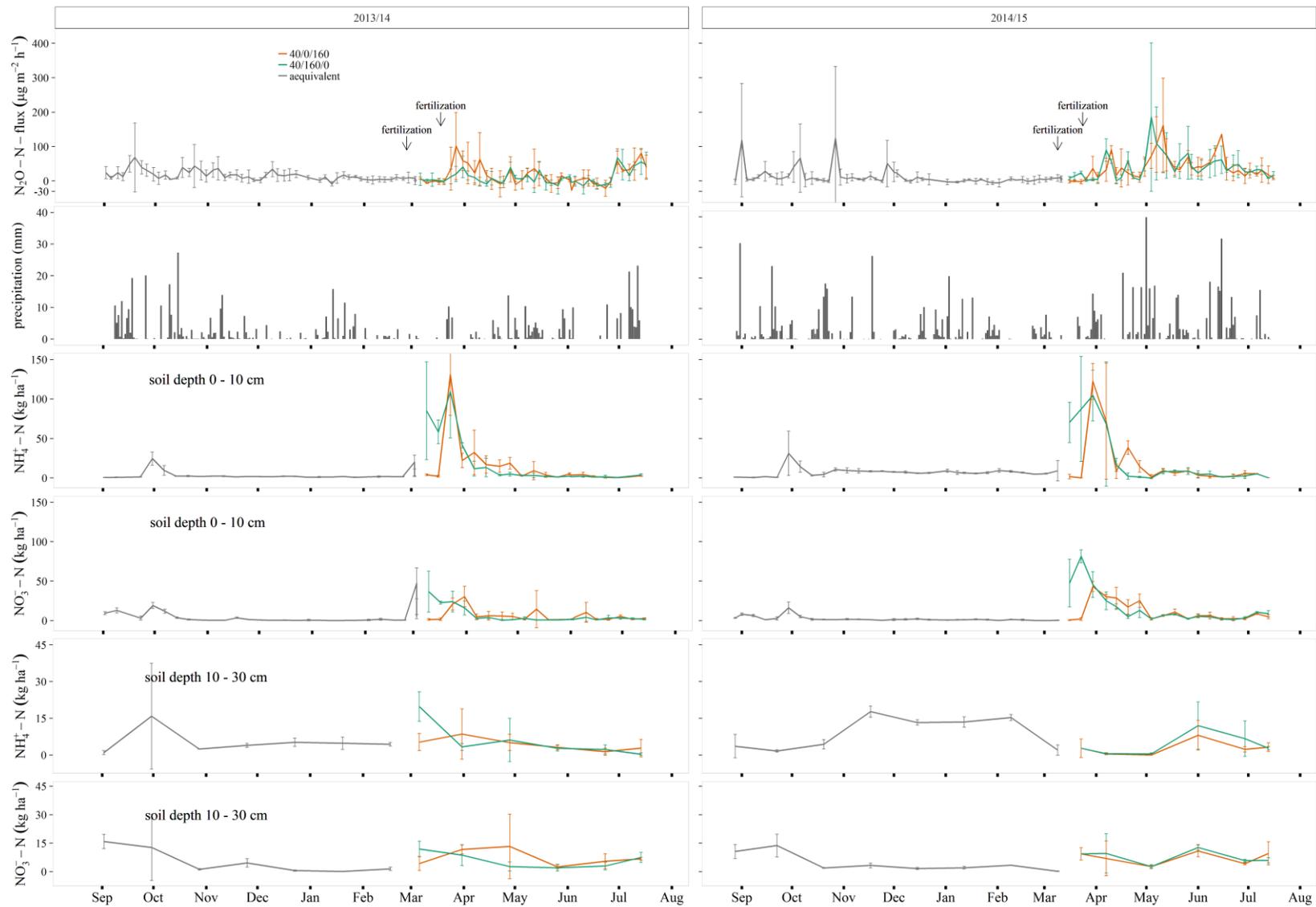


Abbildung 30: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/160/0 und 40/0/160

3.2.5 Wirkung eines N-Düngesystems auf Ertragsparameter, N-Dynamik und N₂O-Emissionen

Das Ziel von N-Düngesystemen wie dem TUMA-Düngealgorithmus für Raps ist es, die von Jahr zu Jahr sowie zwischen den Teilschlägen unterschiedliche Pflanzenentwicklung so gut wie möglich in die weitere Düngeplanung mit einzuschließen. Im Vergleich zu starren Gabenaufteilungen wie 40/120/60 wird im Herbst bereits aufgenommenen Stickstoff mithilfe von Sensordaten aus dem Bestand auf die Frühjahrsgabe angerechnet. Außerdem wird, je weiter die Bestände entwickelt sind bzw. je geringer die Pflanzenverluste über Winter waren, eine Verschiebung der Düngergabenaufteilung zu Gunsten einer späteren schossbetonten Düngung vorgenommen. Dies führte in den TUMA-Varianten in 2013/14 zur Gabenaufteilung 40/50/105 bzw. in 2014/15 zur Gabenaufteilung 40/50/100. Dementsprechend niedriger ist in beiden Jahren die N-Aufnahme der TUMA-Variante in der oberirdischen Biomasse (Abbildung 31).

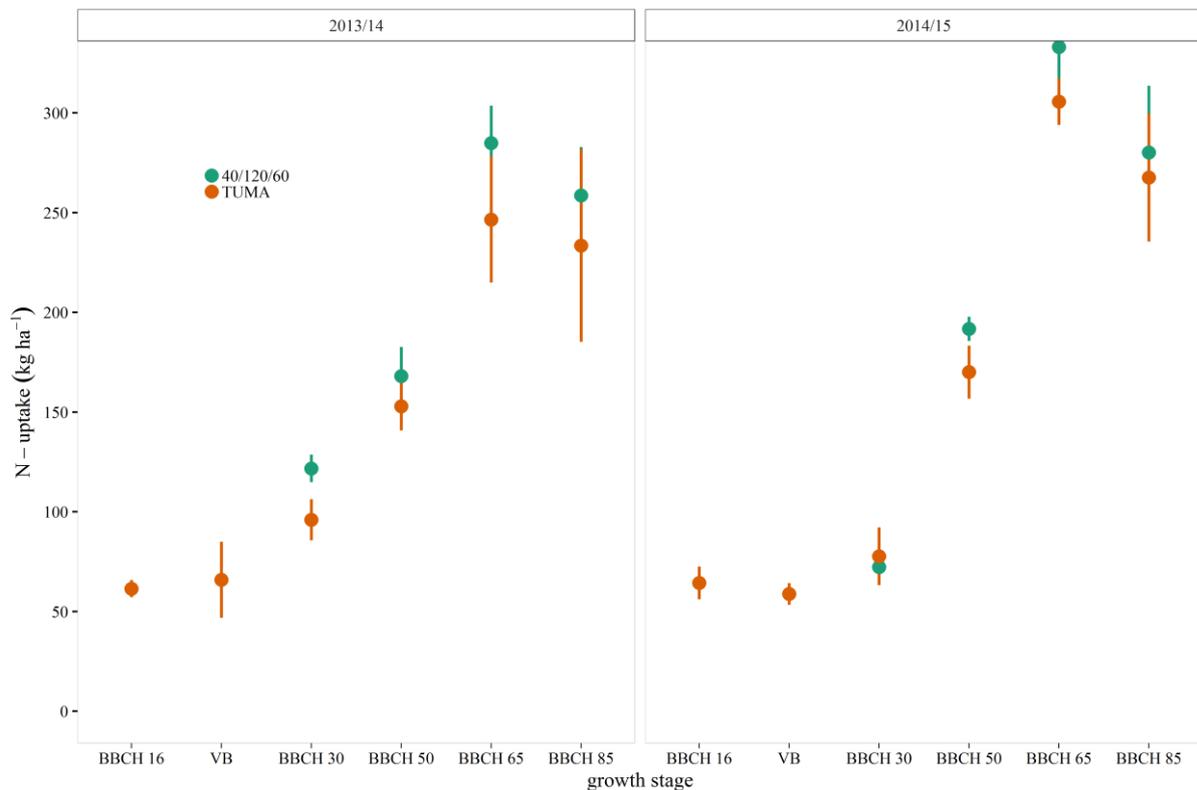


Abbildung 31: N-Aufnahme in den Varianten 40/120/60 und TUMA

Die Ölerträge waren in der TUMA-Variante in beiden Jahren allerdings nicht signifikant niedriger, als in der 25 bzw. 30 kg ha⁻¹ N höher gedüngten Referenzvariante 40/120/60 (Abbildung 32).

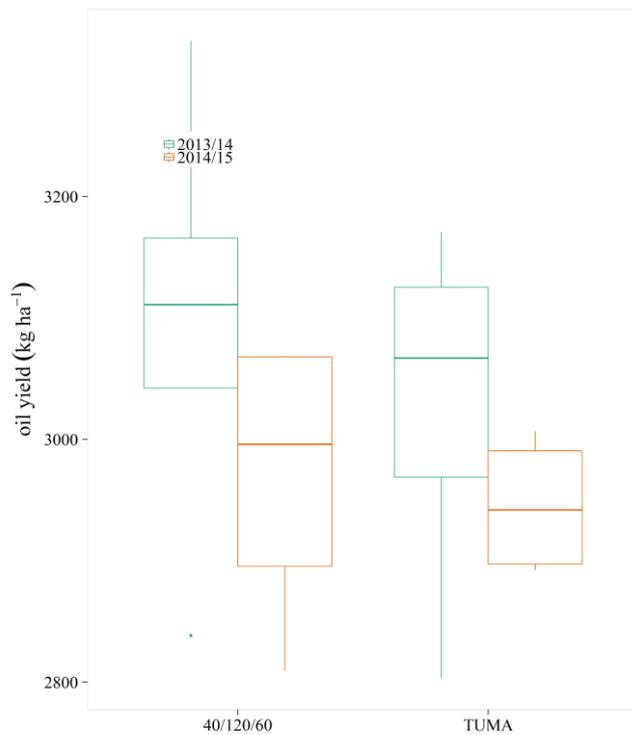


Abbildung 32: Ölerträge in den Varianten 40/120/60 und TUMA

Außerdem wies die TUMA-Variante in beiden Jahren signifikant niedrigere N-Bilanzen als die Referenzvariante auf, was im Zuge des verschärften Düngerechts relevant werden kann (Abbildung 33).

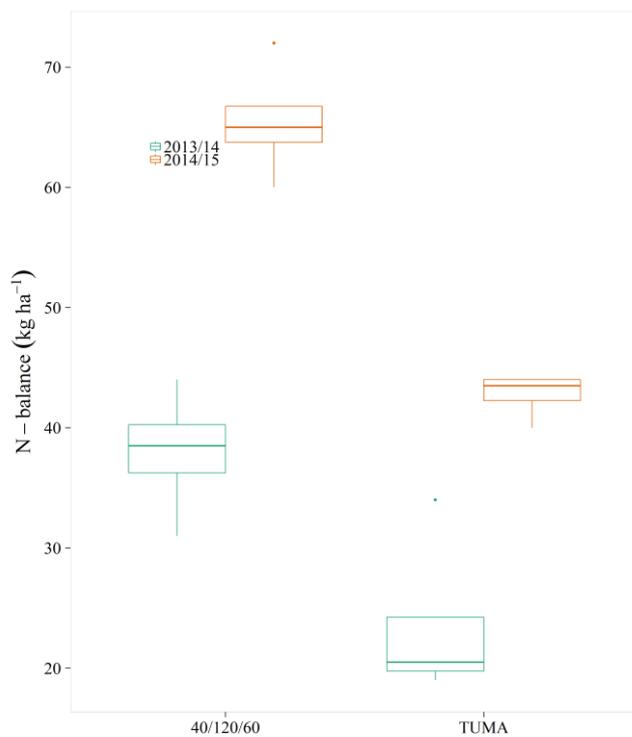


Abbildung 33: N-Bilanz in den Varianten 40/120/60 und TUMA

Die N_{\min} - sowie die N_2O -Dynamik betreffend unterschieden sich beide Varianten über die Versuchsjahre nicht so deutlich, wie man es aufgrund der N-Bilanzen erwarten hätte können (Abbildung 34). Dies mag einerseits wieder am hohen Ertragsniveau des Versuches liegen, andererseits gibt es vor allem in 2013/14 zu Vegetationsbeginn bis zur Blüte deutliche Vorteile der TUMA-Variante bei den N_2O -Emissionen. Außerdem sind auftretende Emissionspeaks nie so stark ausgeprägt, wie unter der Variante 40/120/60.

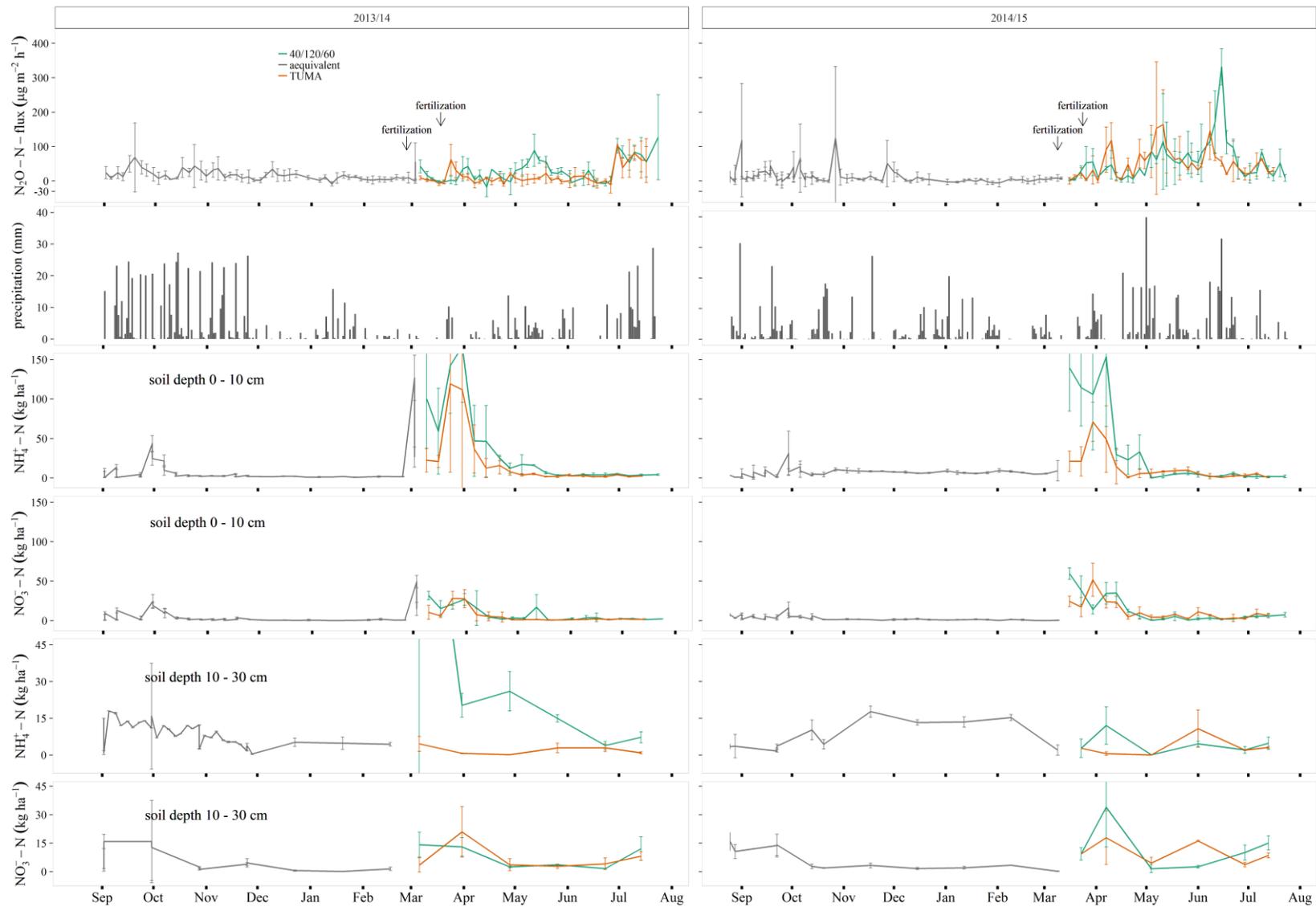


Abbildung 34: N_2O -Flüsse, N_{min} -Dynamik, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Niederschlag der Varianten 40/120/60 und TUMA

3.3 Wirkung unterschiedlicher Rapsgenotypen auf die Effizienz der N-Düngung

In den letzten Jahren kam es zu einer zunehmenden Verbreitung von Halbzwerghybriden im Raps. Sie zeichnen sich durch diverse günstige agronomische Eigenschaften (z. B. erhöhte Standfestigkeit und leichtere Ernte) aus. Daneben sollten sie aufgrund des gedrungeneren Wuchses und der geringeren Biomassebildung zur Ertragsbildung weniger Stickstoff als herkömmliche Hybriden benötigen. Allerdings wurde in den Düngeempfehlungen landläufig die Empfehlung gegeben, die Halbzwerge genauso wie andere Genotypen zu düngen. Ziel der vorliegenden Versuche waren die Charakterisierung der N-Aufnahme von Halbzwergen gegenüber Normalhybriden und einer Liniensorte sowie die Identifikation des N-Einsparpotentials bei der Düngung (Prüfung der späten Normalhybride und der Liniensorte nur in 2014/15). Dazu wurden Stickstoffsteigerungsversuche angelegt, die nachfolgend ausgewertet wurden. Alle Bestände wurden im Herbst mit 40 kg ha^{-1} Stickstoff angedüngt.

Bei einer im Frühjahr unterlassenen N-Düngung zeigte die Halbzwerghybride dieselbe N-Aufnahme wie alle anderen Genotypen (Abbildung 35).

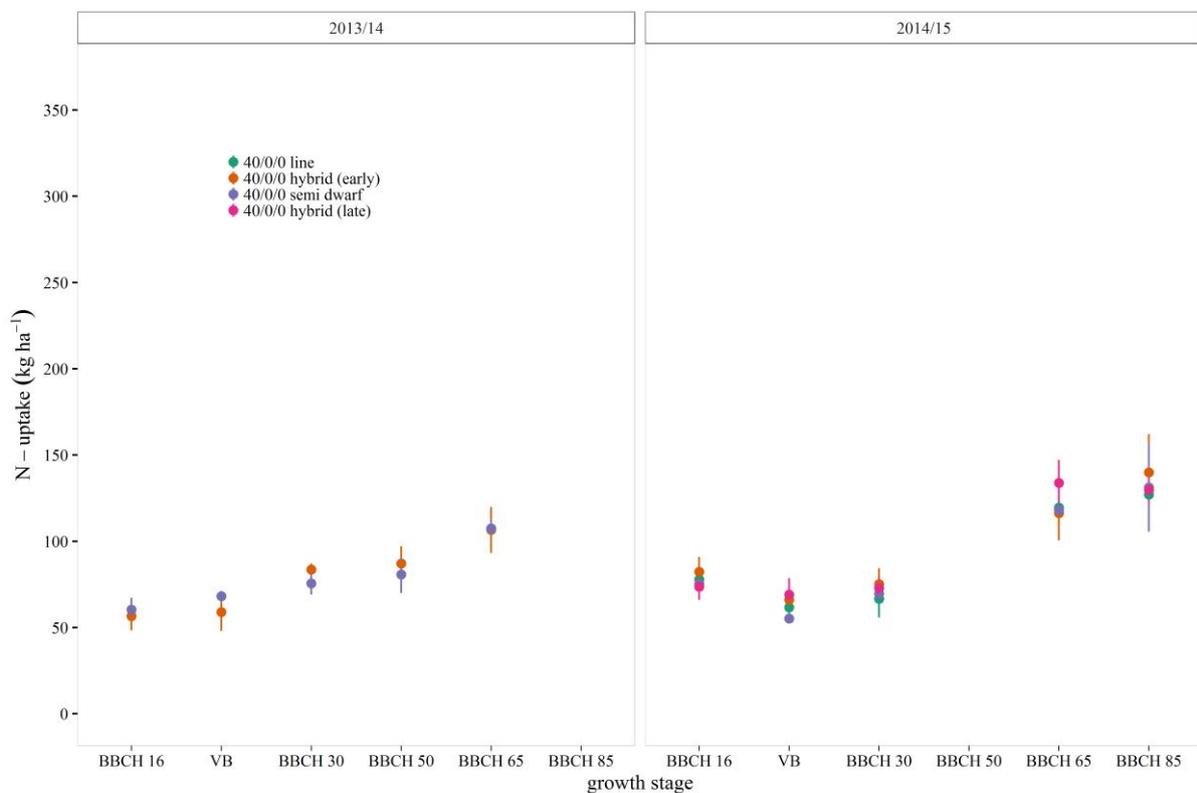


Abbildung 35: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch

Auch hinsichtlich des Ölertrags (Abbildung 36) unterschieden sich die geprüften Sorten in den Versuchsjahren nicht signifikant voneinander.

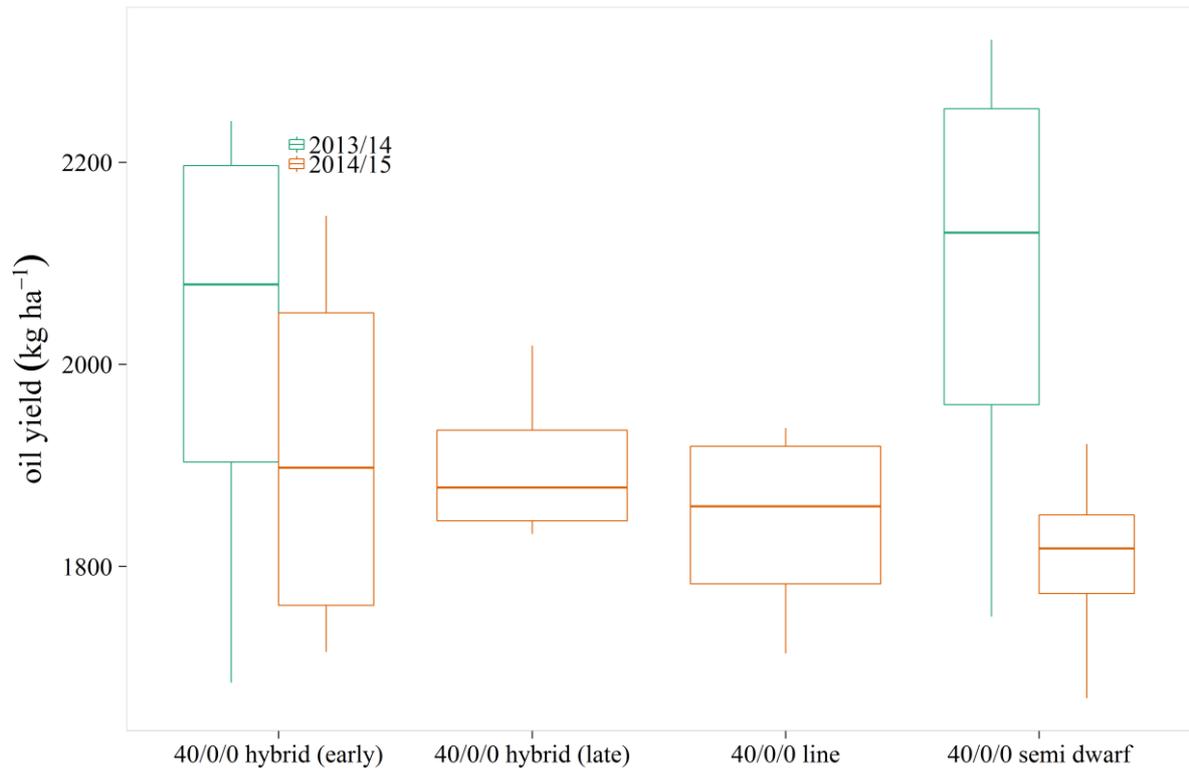


Abbildung 36: Ölerträge der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch

Aufgrund des hohen Ertragsniveaus in allen Varianten waren die N-Bilanzen ohne Frühjahrsdüngung durchwegs stark negativ (Abbildung 37).

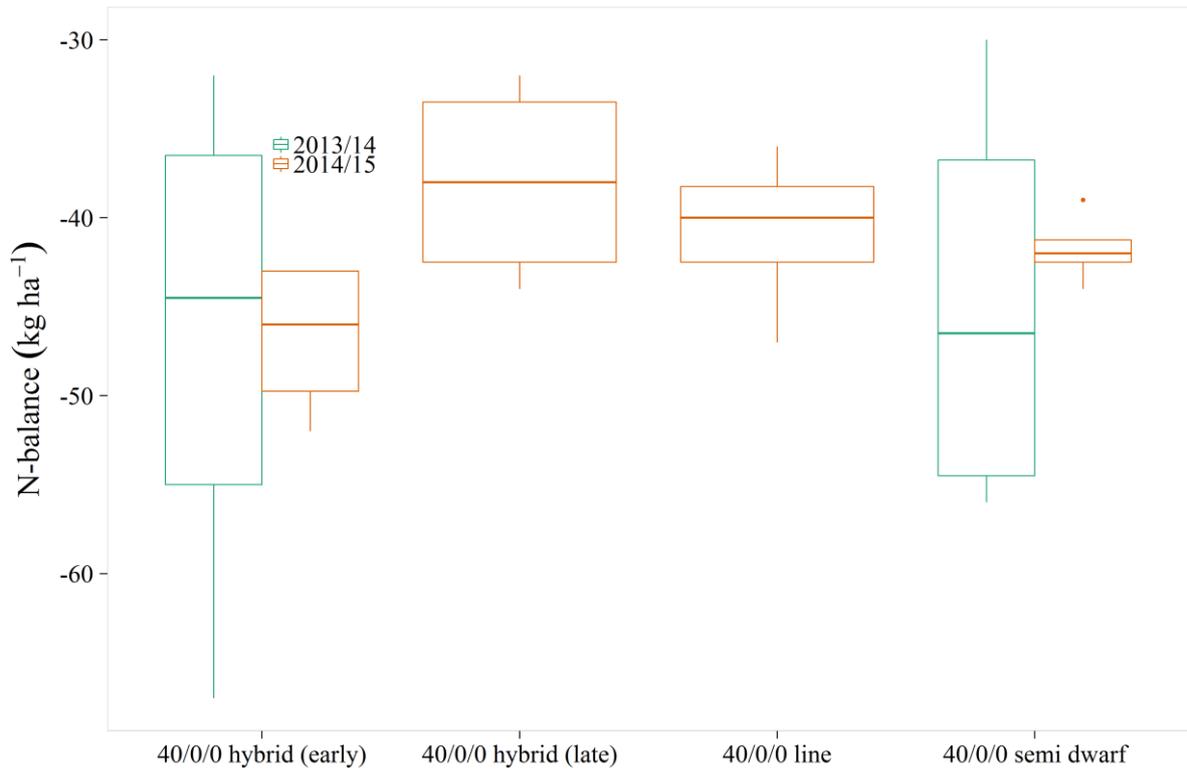


Abbildung 37: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/0/0 im Sortenversuch

Bei einer zusätzlichen Frühjahrsdüngung von 30 kg ha⁻¹ Stickstoff je Düngungstermin traten ebenfalls noch keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern auf (Abbildung 38).

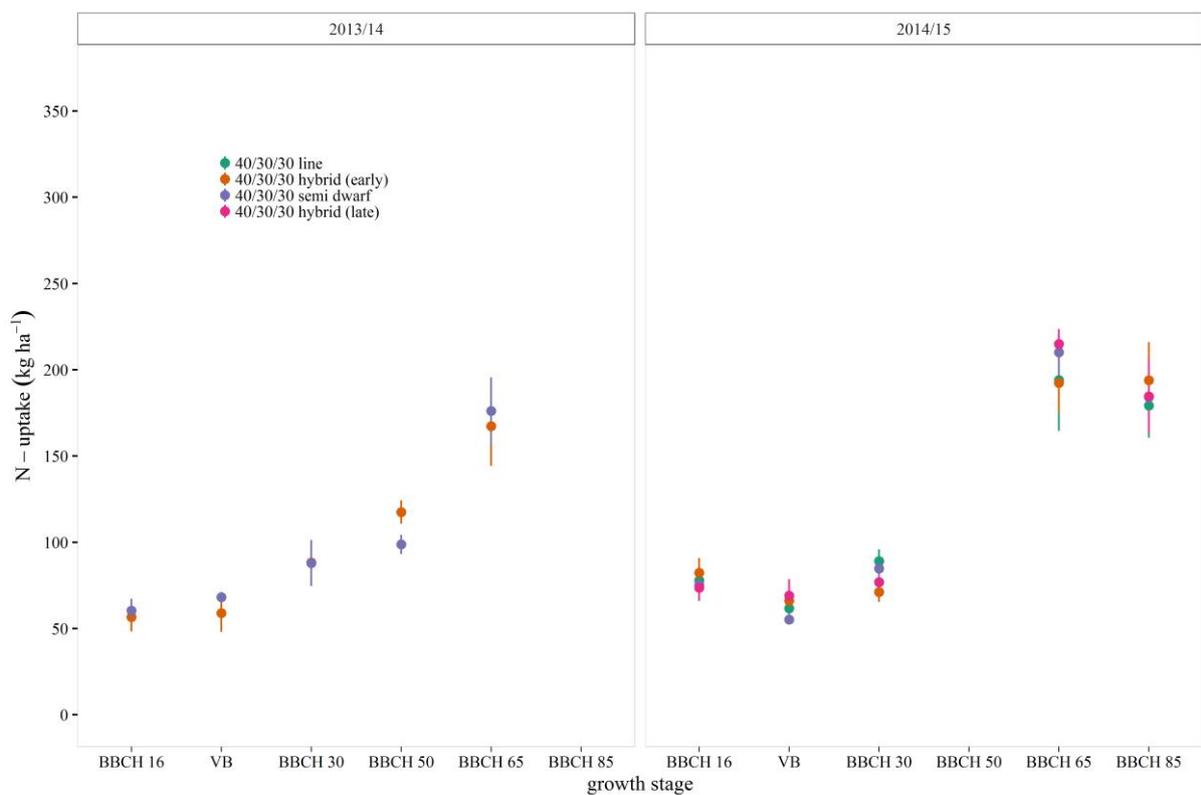


Abbildung 38: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch

Der Ölertrag (Abbildung 39) lag in beiden Versuchsjahren und Varianten wieder auf demselben Niveau, wobei die Halbzwerghybride im Niedrigertragsjahr 2014/15 etwas abfiel.

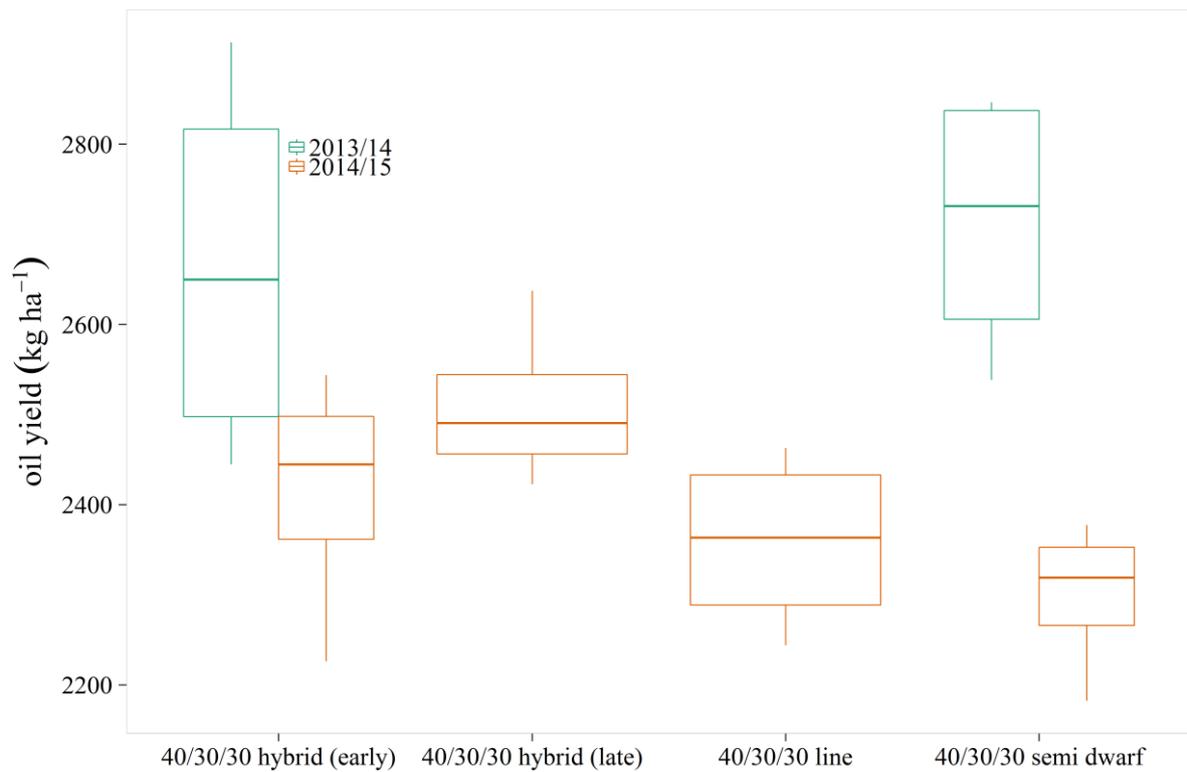


Abbildung 39: Ölerträge der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch

Die N-Bilanzen für die gesamt 60 kg ha⁻¹ N-Frühjahrsdüngung gaben das einheitliche Bild der übrigen Ertragsparameter wider (Abbildung 40).

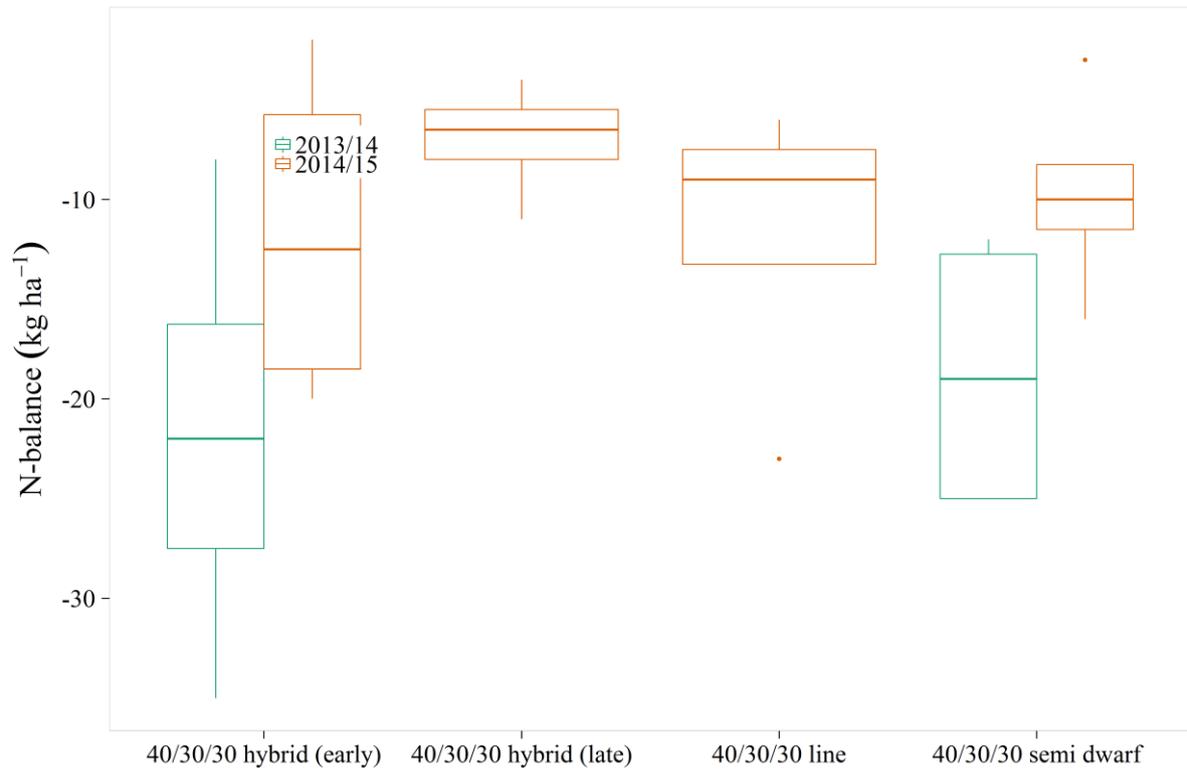


Abbildung 40: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/30/30 im Sortenversuch

Bei einer weiteren Steigerung der Frühjahrsdüngung von 40/30/30 auf 40/60/60 wurde bei der N-Aufnahme langsam sichtbar, dass die Halbzwerghybride von den anderen Sorten speziell in den späteren EC-Stadien überholt wurde (Abbildung 41).

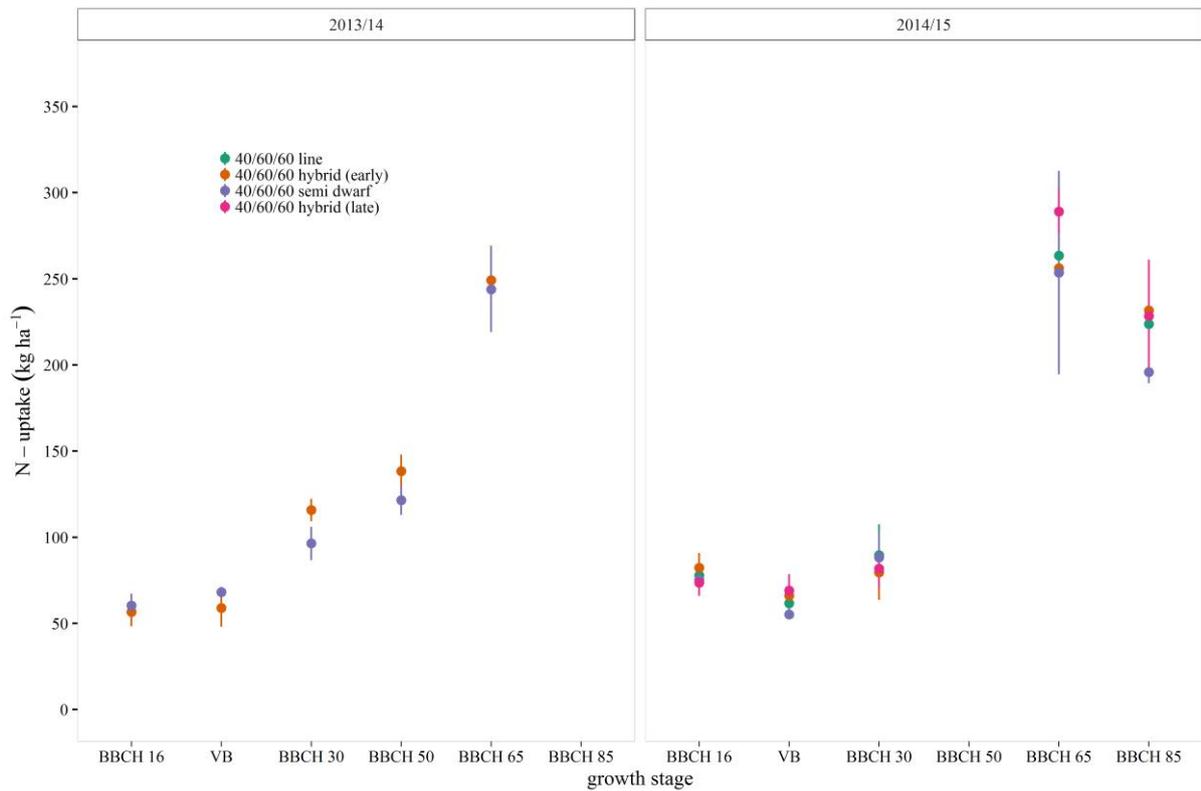


Abbildung 41: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch

Im zweiten Versuchsjahr wies der Halbzwerghybrid nun auch eine deutliche Tendenz zu niedrigeren Ölerträgen verglichen mit allen anderen Sorten auf (Abbildung 42)

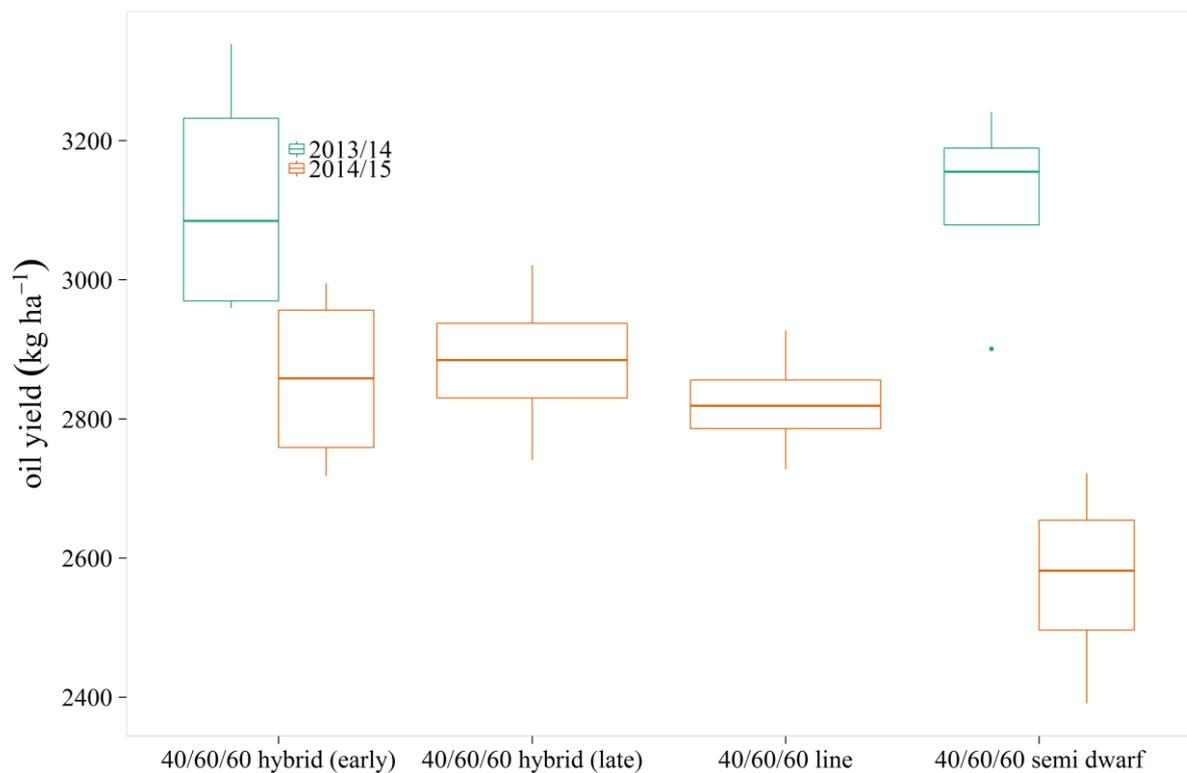


Abbildung 42: Ölerträge der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch

Der niedrigste Ölertrag (Abbildung 43) des Halbzwergs bedingte dann auch die höchste N-Bilanz unter den geprüften Sortentypen, wobei die Unterschiede im Hohertragsjahr 2013/14 nicht sehr differierten.

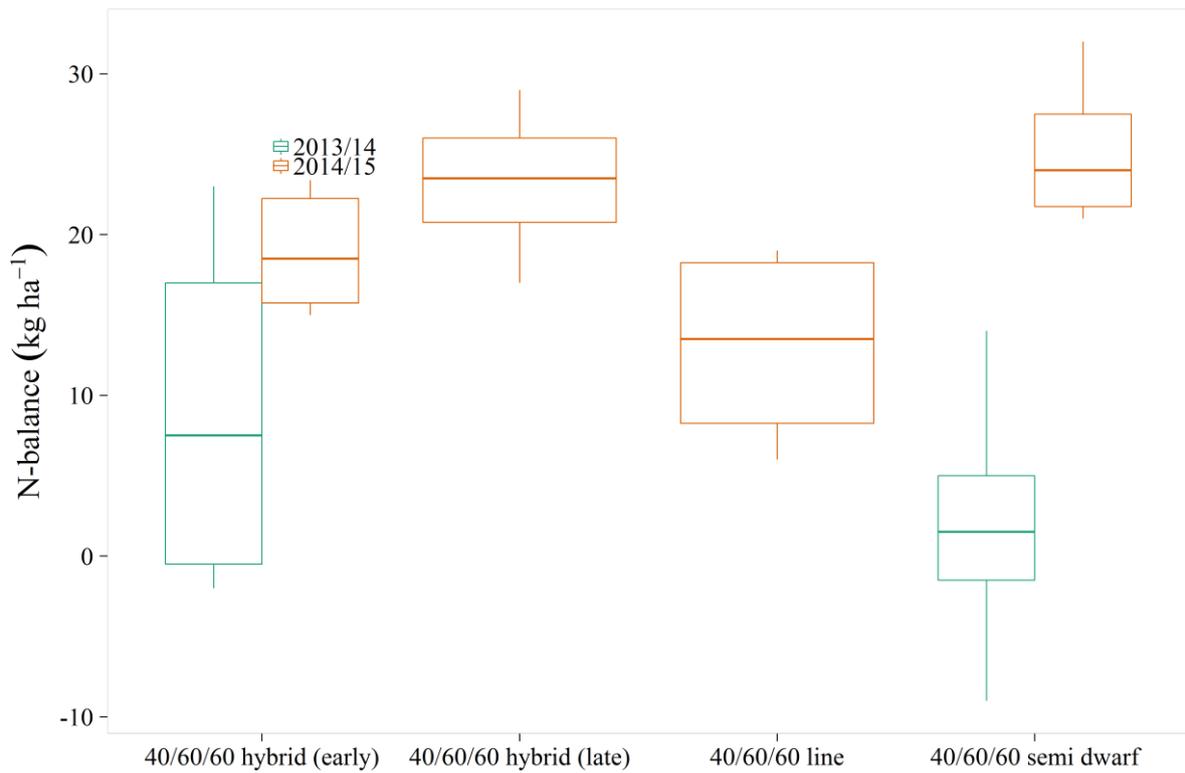


Abbildung 43: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/60/60 im Sortenversuch

Eine weitere zusätzliche Spätdüngung von 60 kg ha⁻¹ N ließ die Unterschiede in der N-Aufnahme zwischen den Genotypen wieder zusammenschmelzen (Abbildung 44). Dies lässt darauf schließen, dass gerade eine Vegetationsbeginn-betonte N-Düngung für Halbzwerghybriden von Nachteil sein kann (z.B. wenn langsamere N-Verlagerungsprozesse in der Pflanze und schnellere Abreife eine effiziente N-Aufnahme verhindern).

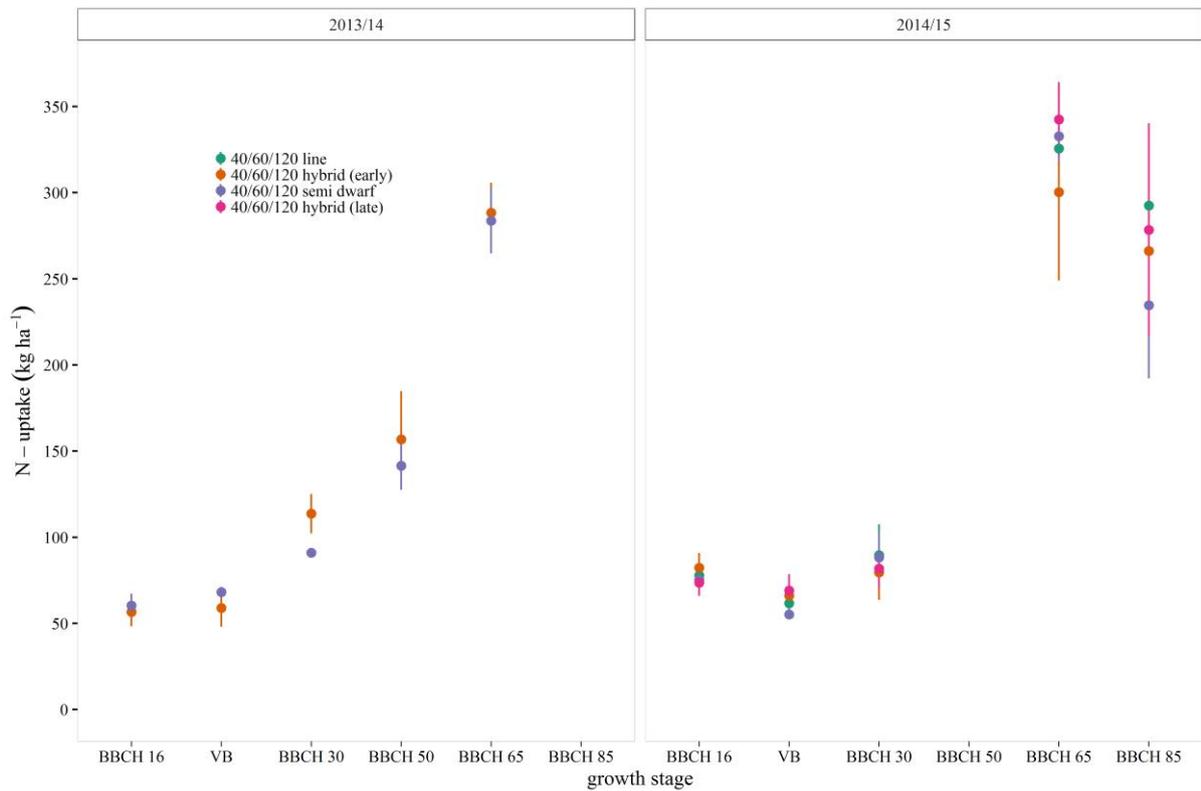


Abbildung 44: N-Aufnahmen der Düngungsvariante 40/60/120 im Sortenversuch

Dennoch erreichte die Halbzwerghybride im zweiten Versuchsjahr nicht ganz das Ertragsniveau der übrigen Genotypen (Abbildung 45).

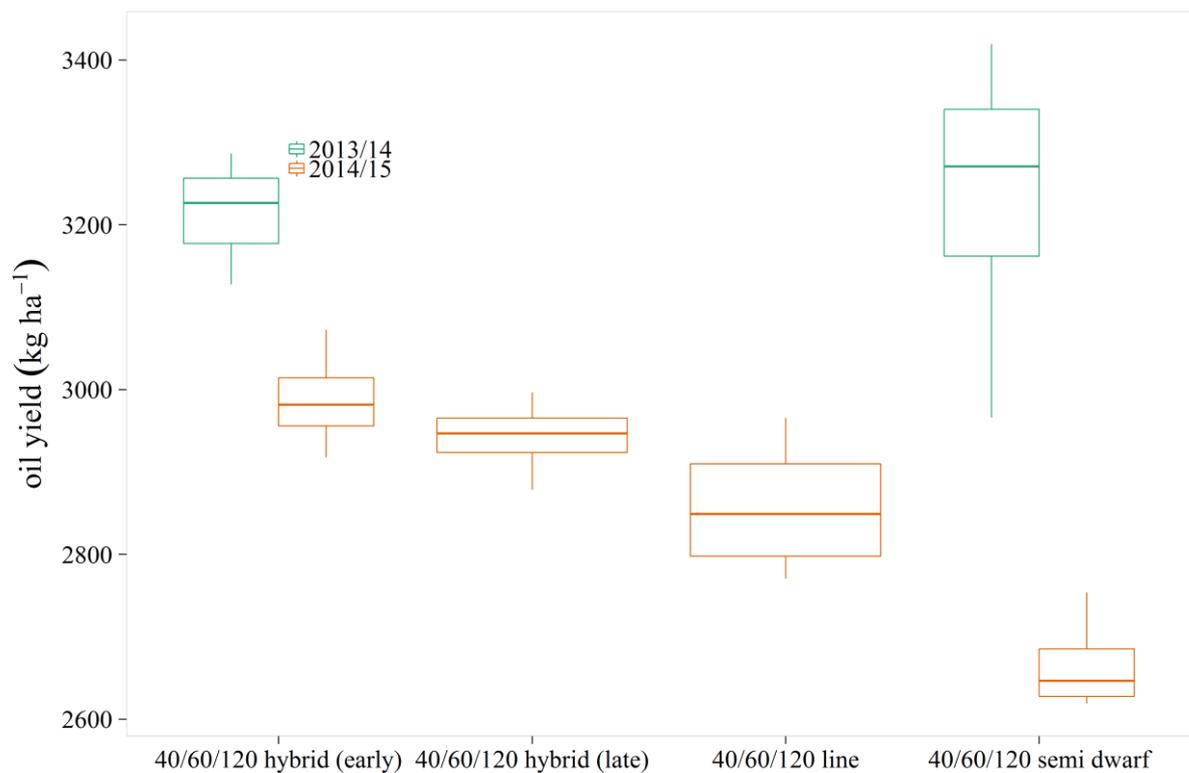


Abbildung 45: Ölerträge der Düngungsvariante 40/120/60 im Sortenversuch

Für die N-Bilanzen bedeutete dies in einem Hohertragsjahr wie 2013/14 keinen Nachteil für die Halbzwerghybride, wohl aber in einem für die Pflanzenentwicklung schwierigeren Jahr wie 2014/15 (Abbildung 46).

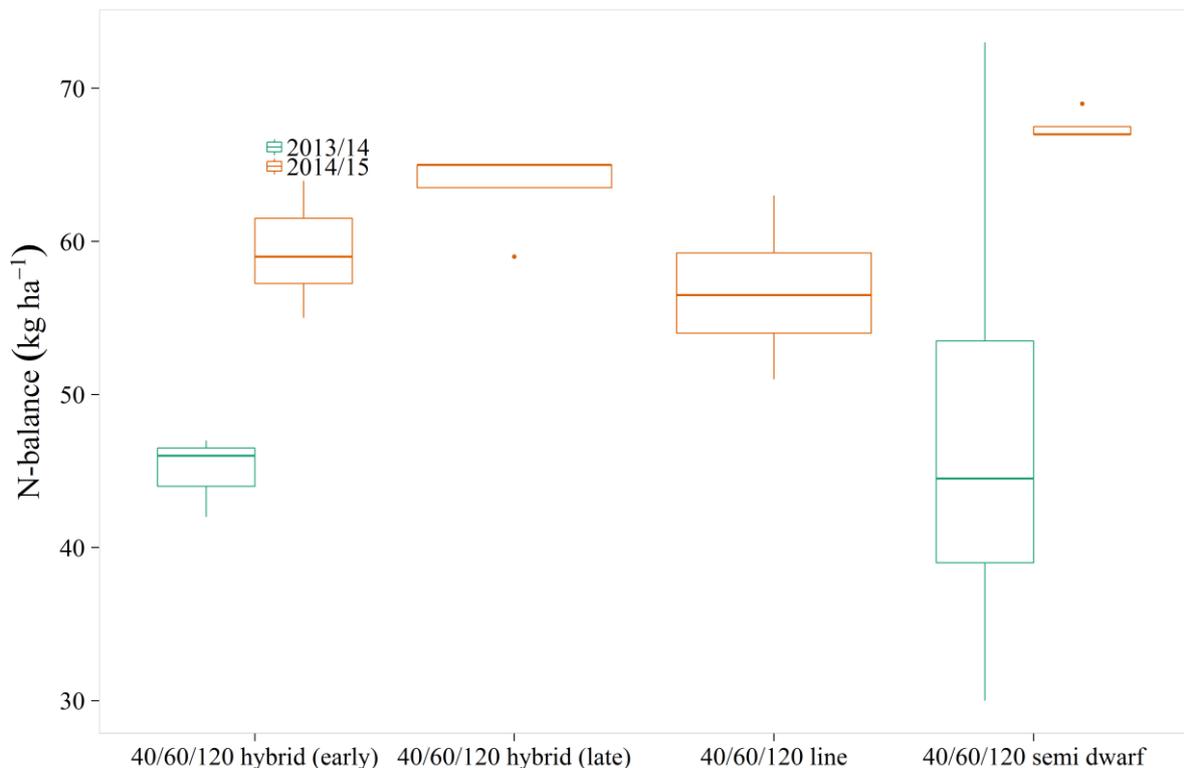


Abbildung 46: N-Bilanzen der Düngungsvariante 40/60/120 im Sortenversuch

Vor allem im Kontext der Stickstoffaufnahme ist wichtig zu erwähnen, dass die Halbzwerghybride in ihrer Entwicklung den übrigen geprüften Genotypen in der Entwicklung immer etwas hinterher war. Das bedeutet, die Schnittermine zum selben EC-Stadium erfolgten beim Halbzweig meist 3-5 Tage später. Würde dieser Genotyp bei der N-Düngung folglich wie eine Normalhybride behandelt werden, wären aufgrund der oben gezeigten Sortenreaktion Mindererträge zu erwarten. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist der Halbzweig eher für N-extensive Produktionsverfahren geeignet, zumindest aber für eine spätere schossbetonte N-Düngung im Frühjahr.

3.4 Produktbezogene Betrachtung der N₂O-Emissionen

Für eine richtige Einordnung der N₂O-Emissionen an einem Standort sollte die Emissionsberechnung immer ertragsbezogen erfolgen, um das Ertragspotential und somit die Produktivität des Verfahrens Winterrapsanbau genügend zu berücksichtigen. Außerdem spielt die N-Bilanz bei der Emissionsberechnung eine große Rolle, weil die Hypothese im Raum steht, dass ab einem gewissen Punkt keine linearen Zusammenhänge mehr herrschen und hohe N-Überschüsse überproportional viel N₂O bedingen. Dieser Zusammenhang wird auf Basis aller in Rogenstein gesammelten Messwerte ungeachtet der Düngungshöhe und Düngeverteilung geprüft und bestätigt (Abbildung 47).

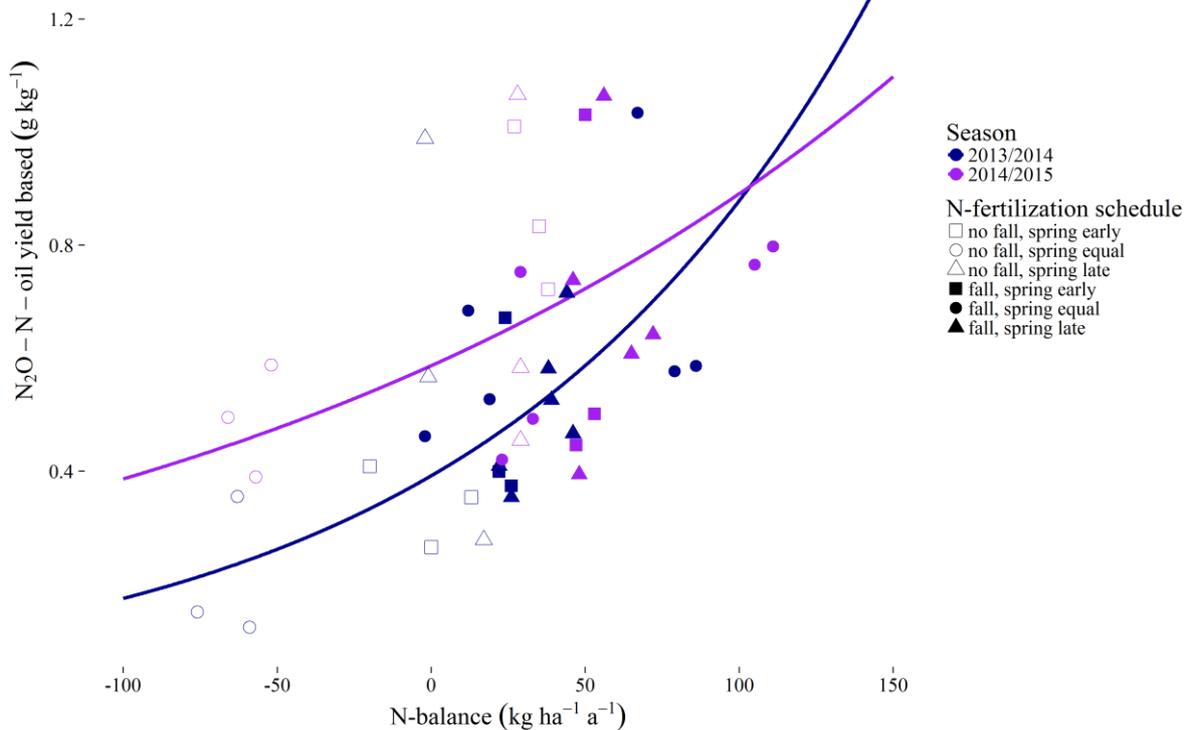


Abbildung 47: Produktbezogene und N-Bilanz-abhängige N₂O-Emissionen für Roggenstein

3.5 Ermittlung von N₂O-Emissionsfaktoren für den Standort Roggenstein

Auf Basis von Berechnungstools wie dem GNOC-Rechner (Köble 2014) ist es möglich, die N₂O-Emissionshöhe für einen Standort kultur- sowie ertragsabhängig zu berechnen. Beim Vergleich dieser theoretischen (offiziell gültigen) Werte mit eigenen Messdaten sind die N₂O-Emissionen in beiden Versuchsjahren niedriger (Abbildung 48). Die Emissionsfaktoren betragen auf Basis der eigenen Messungen im Raps für das Jahr 2013/14 0,55 % und für das Jahr 2014/15 0,69 %, was in beiden Jahren unter dem Emissionsfaktor von 1 % (IPCC 2006) für direkte N₂O-Feldemissionen liegt.

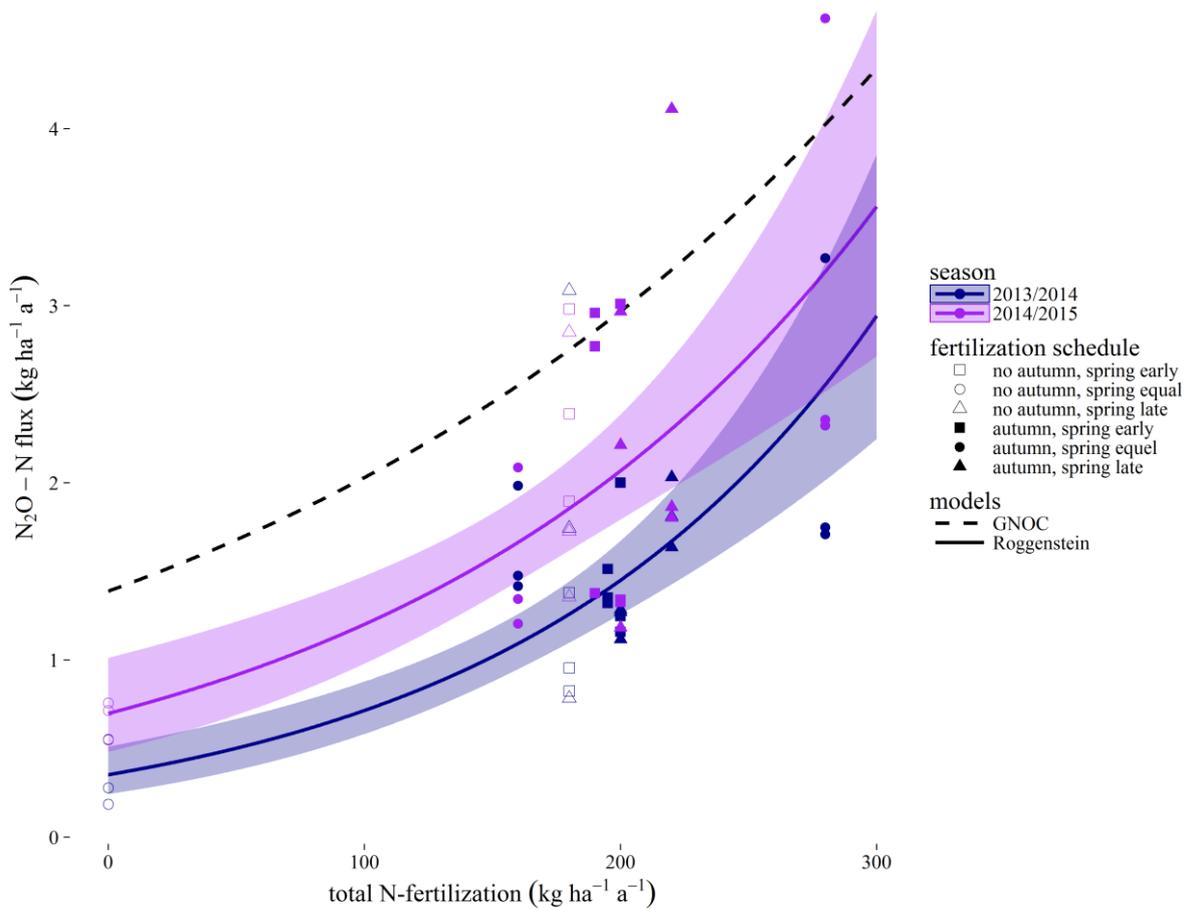


Abbildung 48: N-Inputabhängige N₂O-Emissionsraten am Standort Roggenstein

3.6 Vergleich der gemessenen N₂O-Emissionen mit Modelldaten aus GNOC

Nachstehend sind in Tabelle 5 die am Standort Roggenstein gemessenen N₂O-Emissionen dargestellt und mit Kalkulationsdaten aus dem Treibhausgasrechner GNOC verglichen. Die gemessenen Emissionen liegen in beiden Jahren unter den kalkulierten Werten. Auffällig ist, dass ein Großteil der im Versuch gemessenen Emissionen immer erst zwischen Ende April und der Ernte Mitte Juli stattfanden.

Tabelle 5: Gemessene und berechnete N₂O-Emissionen unter Raps am Standort Roggenstein (in kg ha⁻¹ +/- Standardabweichung)

2013/14	Aussaat bis Ernte gemessen	Aussaat bis Ernte nach GNOC	02.09.13 - 27.02.14 (gemessen)	27.02.14 - 28.04.14 (gemessen)	28.04.14 bis 17.07.14 (gemessen)
0/0/0	0,29 +/- 0,16	0,79	0,34 +/- 0,05	-0,05 +/- 0,04	0,00 +/- 0,10
TUMA	1,22 +/- 0,09	2,45	0,72 +/- 0,04	0,30 +/- 0,22	0,32 +/- 0,07
40/60/60	1,42 +/- 0,27	2,00	0,72 +/- 0,04	0,14 +/- 0,02	0,23 +/- 0,13
0/120/60	1,63 +/- 1,01	2,28	0,34 +/- 0,05	0,17 +/- 0,13	0,44 +/- 0,24
0/60/120	0,92 +/- 0,25	2,32	0,34 +/- 0,05	0,38 +/- 0,22	0,99 +/- 0,75
40/120/120	1,95 +/- 0,78	3,54	0,72 +/- 0,04	0,34 +/- 0,40	0,72 +/- 0,12
40/160/0	1,07 +/- 0,08	2,51	0,72 +/- 0,04	0,12 +/- 0,08	0,33 +/- 0,13
40/0/160	1,28 +/- 0,40	2,50	0,72 +/- 0,04	0,29 +/- 0,19	0,27 +/- 0,22
40/120/60	1,59 +/- 0,17	2,76	0,72 +/- 0,04	0,15 +/- 0,09	0,90 +/- 0,42
2014/15	Aussaat bis Ernte gemessen	Aussaat bis Ernte nach GNOC	28.08.14 - 09.03.15 (gemessen)	09.03.15 - 30.04.15 (gemessen)	30.04.15 - 16.07.15 (gemessen)
0/0/0	0,60 +/- 0,10	0,72	0,31 +/- 0,16	0,07 +/- 0,02	0,21 +/- 0,05
TUMA	2,09 +/- 0,76	2,37	0,52 +/- 0,62	0,38 +/- 0,14	0,53 +/- 0,16
40/60/60	1,36 +/- 0,42	1,98	0,52 +/- 0,62	0,36 +/- 0,18	1,06 +/- 0,41
0/120/60	1,74 +/- 0,69	2,17	0,31 +/- 0,16	0,38 +/- 0,04	1,47 +/- 0,65
0/60/120	2,14 +/- 0,48	2,22	0,31 +/- 0,16	0,31 +/- 0,08	1,06 +/- 0,57
40/120/120	2,74 +/- 1,16	3,47	0,52 +/- 0,62	0,43 +/- 0,09	1,19 +/- 0,58
40/160/0	1,87 +/- 0,79	2,46	0,52 +/- 0,62	0,29 +/- 0,03	0,90 +/- 0,33
40/0/160	1,67 +/- 0,85	2,40	0,52 +/- 0,62	0,25 +/- 0,15	1,79 +/- 0,59
40/120/60	2,29 +/- 1,16	2,72	0,52 +/- 0,62	0,33 +/- 0,06	1,46 +/- 0,64

4 Diskussion

Ziel der Versuchsanstellung war es, Hot-Spots der N-Verluste im Rahmen des Winterrapsanbaus zu identifizieren und daraus bei der N-Düngung wie auch im Nacherntemanagement zuverlässige Minderungsstrategien zu entwickeln, um die Treibhausgasbilanz von Rapsöl und des daraus erzeugten Rapsmethylesters nachhaltig zu verbessern.

Um die Hot-Spots der N_2O -Bildung bei der Winterrapsdüngung noch besser herauszuarbeiten, wurde das ursprünglich geplante Versuchsdesign präzisiert. Es wurden in Anlehnung an die Variante precision-farming mehrere Varianten ähnlichen Aufbaus gelegt, um die Terminierungseffekte wie auch die Düngungshöhe bis zu gewissen Extrema auszuweiten und so einen besseren Eindruck der hier die N_2O -Bildung treibenden Prozesse zu bekommen. Das Nacherntemanagement wurde vom ursprünglichen N-Düngungsversuch abgespalten, um genaue und vor allem auch praxisorientierte Aussagen bezüglich pflanzenbaulicher Strategien zur Vermeidung von N-Verlusten nach Winterraps zu bekommen.

In der Düngung konnte gezeigt werden, dass sich nicht nur die Staffelung der N-Menge, sondern auch ihre Terminierung abhängig von der Witterung zeitweise stark auf die N_2O -Dynamik auswirken kann, wobei Jahreseffekte eine nicht zu unterschätzende Rolle spielen. So müssen gesteigerte N-Düngergaben nicht zwingend mit einer Erhöhung der N_2O -Emissionen verbunden sein, wenn sich die Gaben an der Bestandesentwicklung orientieren. Das zeigt sich auch in der Tatsache, dass hohe Einmalgaben an Stickstoff nicht unbedingt zu höheren kumulierten N_2O -Emissionen geführt haben bzw. auf der anderen Seite niedrige auf mehrere Düngetermine verteilte Gaben trotzdem hohe Emissionen hervorgerufen haben. Das kann z.B. geschehen, wenn die N-Düngung mit Sauerstoffmangel im Boden und einer nur verhaltenen N-Aufnahme (speziell im frühen Frühjahr) zusammentreffen. Gerade Ansätze des precision farming wie das TUMA-Düngesystem zu Winterraps greifen mit ihrem Algorithmus den Pflanzenbedarf auf und setzen sie in eine noch klimaverträglichere Düngung um. Deutlich wurde durch die Messungen aber auch, dass ein Großteil der N_2O -Emissionen unter Winterraps erst zwischen Blüte und Ernte auftreten – einem Bereich, den man durch pflanzenbauliche Maßnahmen nicht mehr unmittelbar beeinflussen kann. Hier waren es oft Varianten mit gedüngten N-Mengen von über 200 kg ha^{-1} , die höhere Emissionen aufwiesen. Darüber hinaus konnten durch die Herbstdüngung bei optimalen Entwicklungsbedingungen für die Pflanzenbestände keine Ertragsvorteile erzielt werden. Die zusätzliche N-Düngung erhöhte allerdings im selben Maß die N-Bilanzen und führte auch teilweise zu höheren N_2O -Emissionen, was im Zuge einer Verschärfung des Düngerechts kritisch zu hinterfragen ist.

Das Nacherntemanagement zeigte Potentiale, aber vor allem auch Grenzen ackerbaulicher Maßnahmen zur Konservierung von N-Überhängen nach der Winterraps-ernte auf. Das bewährte Fruchtfolgeglied Raps – Weizen scheint unter den Bedingungen reiner Marktfruchtbetriebe wie am Standort Roggenstein neben anderen auch aus Sicht der Treibhausgasemissionen keine schlechte Lösung zu sein, wenn man es mit der hier höhere Emissionen verursachenden Wintergerste vergleicht. Zwischenfrüchte können mit Sicherheit einen großen Anteil an der N-Konservierung nach Winterraps einnehmen, wenn gleich die Wahl einer geeigneten Zwischenfrucht sich nicht nur an ihrer N-Aufnahme orientieren darf.

Mit Blick auf die Sortenwahl bleibt unter dem Eindruck der hier geprüften Genotypen festzuhalten, dass sich Halbzwerghybriden bei moderater N-Düngung in ihren N-Bilanzen nicht von anderen Genotypen unterscheiden. Bei gesteigertem N-Angebot konnten diese hier den zusätzlichen Stickstoff allerdings nicht in gleichem Maß in Kornertrag umsetzen. Bei der Beurteilung der Wirkungen solcher Genotypen auf den N-Haushalt muss ferner berücksichtigt werden, dass bei Rapsstroh mehr als bei anderen Kulturen für eine gewisse Zeit im Jahr eine N-immobilisierende Wirkung zukommen kann, die bei den Halbzwerghen durch eine geringere Biomassebildung kleiner ausfallen kann. Das wiederum würde mehr Stickstoff im Boden verlustgefährdet hinterlassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die mit dem Versuchsaufbau eingangs verfolgten Ziele erreicht wurden, wenngleich sich viele neue interessante Aspekte ergeben haben, mit denen man zu Beginn der Versuche nicht gerechnet hatte (höhere N_2O -Emissionen bei Gerste als bei Weizen, niedrige N_2O -Emissionen bei sehr hohen N-Einmalgaben je nach Witterung).

Die Versuchsdurchführung erwies sich als unproblematisch und effizient, lediglich bei der Messung der Bodenfeuchte gilt es, in Zukunft noch höher aufgelöst (online) zu messen, da Roggenstein als gut dränender Standort permanent niedrige Wassergehalte aufwies. Die Feuchtedynamik konnte mit der Probenahme im Turnus der wöchentlichen N_{\min} -Beprobung noch nicht optimal abgebildet werden. Die insgesamt niedrigen N_2O -Emissionen sowie die gute Drainung des Standortes zeigten immer wieder, dass hohe Niederschlagsmengen unter Anwesenheit von Nitrat und einer Kohlenstoffquelle nicht alleine für erhöhte Emissionen sorgen können. Die Dauer der reduzierenden Bedingungen im Boden ist von großer Bedeutung, obgleich das Redoxpotenzial immer noch nicht befriedigend aufgezeichnet werden kann. In der ersten Messsaison traten im Nachernterversuch in zwei von drei Wiederholungen der Variante „Welsches Weidelgras“ sehr hohe N_2O -Emissionen auf, die weder mit anderen im Versuch erhobenen Messgrößen erklärt werden konnten, noch sich im zweiten Versuchsjahr wieder in ähnlicher Form zeigten. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich bereits vor der Versuchsanlage aus der historischen Bewirtschaftung Verdichtungen im Unterboden ergaben haben, die zu dieser enormen Emissionsdynamik führten. Für zukünftige Messreihen bietet es sich deshalb unter anderem an, zugunsten noch genauerer Aussagen die Anzahl der Wiederholungen zu erhöhen und dafür Varianten einzusparen.

Die hochauflösende Messung von N_2O -Proben über das ganze Jahr hinweg hat sich für den Standort Roggenstein trotz anfänglicher Diskussionen über die Machbarkeit als sehr geeignet erwiesen, weil dadurch alleine schon aufgrund der schnell wechselnden Bodenfeuchte Emissionsereignisse zuverlässig abgedeckt werden konnten.

Die Zusammenarbeit mit dem Thünen-Institut für Agrarklimaschutz in Braunschweig zur Analyse der N_2O -Proben gestaltete sich von Beginn des Projektes an sehr konstruktiv und bereichernd für das gesamte Projekt. Dies erstreckte sich von Hinweisen zur Probennahme über die schnelle Probenbearbeitung bis hin zum wissenschaftlichen Diskurs bei der Ergebnisinterpretation. Aufgrund des großen Erfolges dieses Projektes hat sich für die Zukunft ein bundesländerübergreifendes Verbundprojekt zur Wirkungsabschätzung verschiedener N-Formen auf die N_2O - und NH_3 -Emissionen im Fruchtfolgerahmen ergeben, das noch in 2016 startet und von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung gefördert wird.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Im Laufe des Projektes wurde an zahlreichen wissenschaftlichen Tagungen mitgewirkt und teilgenommen, es wurden aber ebenso der breiten Öffentlichkeit zugängliche Veranstaltungen abgehalten.

Anfang April 2014 wurde ein vom Thünen-Institut für Agrarklimaschutz organisiertes Treffen der AG Bodengase der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft besucht. Besprochen wurde unter anderem der dringende Bedarf der Einführung von Standards für THG-Messungen im deutschsprachigen Raum. Es wurde zudem die Veranstaltung einer Summer School für fortgeschrittene Doktoranden im Bereich der Messung von THG angeregt, die letztendlich im August 2015 an der Universität für Bodenkultur in Wien abgehalten wurde. Dort wurde das Projekt vorgestellt und sich im Kontext der Erfahrungen und Projekte anderer mit den übrigen Teilnehmer rege ausgetauscht.

Bei der Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Mitte September 2014 in Wien fanden Ergebnisse aus dem ersten Jahr dieser Forschungsarbeit Eingang in einem eigenen Vortrag sowie in dem Tagungsband zur Veranstaltung. Die Forschungsthematik wurde von der Audienz sehr positiv aufgenommen und intensiv diskutiert. Außerdem bot ein weiterer Vortrag in einem Fachforum auf der Agritechnica 2015 – der weltweit größten Leitmesse für Agrartechnik und modernen Pflanzenbau – zusätzlich die Möglichkeit, das Forschungsprojekt einem breiten Publikum näher zu bringen.

Seit Beginn des Projektes besteht ein enger Kontakt und fachlicher Austausch mit der Forschergruppe des TI für Agrarklimaschutz, was die Methoden sowie die Interpretation von Ergebnissen im Bereich der Treibhausgasmessungen im Feld betrifft. Bei einem Vortrag Mitte Oktober 2014 am Institutsseminar des TI AK in Braunschweig wurde die erste vollständige Versuchssaison im Jahr 2013/14 ausgiebig analysiert und diskutiert sowie Anregungen für den weiteren Ablauf der Feldversuche besprochen.

Bereits seit 2013 wird im jährlichen Turnus Ende Juni der traditionelle Feldtag der Versuchsstation Roggenstein veranstaltet. Dabei wurden einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Wirtschaft unter anderem dieses Projekt und aktuelle Ergebnisse der Forschungsarbeit daraus präsentiert.

Im Frühjahr 2015 besuchte der Bayerische Rundfunk im Rahmen einer Reportage über Treibhausgasemissionen bei der Bioenergieproduktion die Feldversuche in Roggenstein. Es wurden Interviews über die Ausgangsproblematik der mitunter hohen Stickstoffverluste beim Rapsanbau sowie die Zielstellung des Projektes geführt.

Zu guter Letzt wurde das Projekt mehrmals zum Anlass genommen, als Ausgangsbasis für studentische Arbeiten im Rahmen von Vorlesungen oder Forschungsprojekten zu dienen.

Aus den erzielten Projektergebnissen wird einerseits eine Publikation in einer wissenschaftlichen Zeitschrift erstellt, andererseits stellen sie die Grundlage für eine Promotionsschrift dar.

6 Fazit

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich das Vorgehen bei der Durchführung, Auswertung und Interpretation der Feldversuche bewährt hat. Das über mehrere Jahre lückenlose und qualitativ hochwertige Messprogramm erlaubt mittlerweile eine sehr gute Einschätzung der N_2O -Emissionen während und nach Winterraps in Ackerbaubetrieben, wie sie den Bedingungen am Standort Roggenstein entsprechen. Selbst innerhalb des Versuchsstandortes konnten bei derselben Bewirtschaftung vor allem bodenbedingte Unterschiede ausgemacht werden, die zusätzlich zum N-Düngeregime sowie der jahresabhängigen Witterung großen Einfluss auf die N_2O -Emissionen und damit die Öko- bzw. THG-Bilanz des Winterrapsanbaus haben.

Im Bereich des Nacherntemanagements wurde evident, dass nicht nur die Folgefrucht alleine, sondern auch alle in diesem Rahmen stattfindenden Anbaumaßnahmen ausschlaggebend für die N-Dynamik nach der Rapsernte sind. Um zukünftig weitere Stickstoffverlustpfade aufzudecken, könnte das gängige Nacherntemanagement vor dem Hintergrund weiterer Betriebssysteme validiert werden (z.B. langjährig intensive Versorgung mit verschiedenen organischen Düngern, unterschiedliche Fruchtfolgen).

Der Versuchsteil N-Düngung zu Winterraps offenbarte hohe Einsparungspotentiale bei den N_2O -Verlusten, wobei sich die Anlehnung an die langjährig bestehenden Varianten der Stickstoffsteigerungsversuche im Rahmen der Entwicklung des TUMA-Düngealgorithmus zu Winterraps sehr bewährt hat. Es konnte durch die oft aufeinander aufbauenden Varianten gezeigt werden, dass nicht alleine die Höhe der N-Düngung, sondern auch eine richtige Verteilung der Düngung ebenso wichtig für die Vermeidung von N-Verlusten – besonders als N_2O – ist. Hier sind es ebenfalls wieder die unterschiedlichen Betriebstypen, die für zukünftige Versuche von gesteigertem Interesse sein dürften.

In der Prüfung unterschiedlicher Rapsgenotypen auf ihre N-Effizienz mit Fokus auf dem Anbau von Halbzwerghybriden zeigten sich Grenzen einer effizienten N-Verwertung für diesen Genotyp auf, wenn gleich hier nur eine Sorte auf einem Standort getestet wurde.

Um grundlagenorientierte wie zugleich praxisrelevante Ergebnisse zu erzielen, wurde im Vergleich zur ursprünglichen Zielsetzung das Versuchsprogramm leicht angepasst und präzisiert. Es wurden zusätzliche N-Stufen eingeführt und für exaktere Aussagen das Nacherntemanagement vom N-Düngungsversuch entkoppelt. Vor allem das zeitlich hoch auflösende Messprogramm konnte davon profitieren, was einen reibungslosen Arbeitsablauf und eine gleichbleibend hohe Messdichte selbst unter widrigen Bedingungen im Winter ermöglichte. Die Ergebnisse umfassen Empfehlungen, die sowohl klassische pflanzenbauliche Ansätze im Rahmen von Fruchtfolge und N-Düngung berücksichtigen, genauso aber auch neue Ansätze für das precision farming in Bezug auf eine treibhausgasmindernde Düngung verfolgen. Sämtliche Ansätze können helfen, die Bioenergielinie RME in Zukunft vor dem Hintergrund steigender Nachhaltigkeitskriterien im Punkt Klimaschutz besser einordnen zu können.

7 Literaturangaben

BMELV (2009): Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung vom 30. September 2009 (BGBl. I S. 3182), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 26. November 2012 (BGBl. I S. 2363) geändert worden ist. 38 S. Online verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/biokraft-nachv/gesamt.pdf>.

CRUTZEN P., MOSIER A., SMITH K. & WINIWARTER W. (2008): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric chemistry and physics* 8, 389 – 395.

DRÖSLER, M. (2005): Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, Southern Germany. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=603619>.

FNR (2015): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. Online verfügbar unter: http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2015_Web.pdf, zuletzt aufgerufen am 19.11.2015.

FUSS, R.; PEDERSEN, A. (2014): Greenhouse Gas Flux Calculation from Chamber Measurements. Version 0.1. Online verfügbar unter <https://bitbucket.org/ecoRoland/gasfluxes/issues>, zuletzt geprüft am 23.03.2016.

GÄRTNER S. & REINHARDT G. (2003): Erweiterung der Ökobilanz für RME, 22 S. IFEU-Institut, Heidelberg.

KAISER E., KOHRS K., KÜCKE M., SCHNUG E., HEINEMEYER O., MUNCH J.: Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil biology and biochemistry* 30 (12), S. 1553 – 1563. DOI 10.1016/S0038-0717(98)00036-4.

KÖBLE R. (2014): The global nitrous oxide calculator – GNOC. Online tool manual, Version 1.2.4. Online verfügbar unter: <http://gnoc.jrc.ec.europa.eu>. Joint Research Center der Europäischen Union. Ispra, Italien.

HELLEBRAND H., SCHOLZ V. & KERN J. (2008): Nitrogen conversion and nitrous oxide hot spots in energy crop cultivation. *Res. Agr. Eng* 54 (2), 58 – 67.

IPCC (2006): Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Published: IGES, Japan. See Chapter 11 on N₂O emissions from managed soils.

KLEIN, C. DE; HARVEY, M. (2015): Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. Version 1.1. Wellington. ISBN 978-0-478-40584-2.

LEOPOLDINA (2012): Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen. Empfehlungen. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Halle an der Saale. 11 S.

LEVY, P.; GRAY, A.; LEESON, S.; GAIAWYN, J.; KELLY, M.; COOPER, M. ET AL. (2011): Quantification of uncertainty in trace gas fluxes measured by the static chamber method. In: *European Journal of Soil Science* 62 (6), S. 811–821. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01403.x.

MAIDL, F.-X. & SPICKER A. (2012): Optimierte N-Düngung durch Frischmassebestimmung und Sensoreinsatz. *Raps* 30 (4/2012).

PARKIN, T. & VENTEREA R. (2010): Chamber-based Trace Gas Flux Measurements. In: *USDA-ARS GRACEnet Protocols*, 39 S.

RATHKE G.-W., BEHRENS T. & DIEPENBROCK W. (2006): Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 117, 80 – 108.

R DEVELOPEMENT CORE TEAM (2008): R: A language and environment for statistical computing. Version 3.2.3. Vienna, zuletzt geprüft am 23.03.2016.

SCHMÄDECKE, F. (1998): Lachgas- und Methanflüsse eines Gley-Auenbodens unter dem Einfluss einer Rapsfruchtfolge und in Abhängigkeit von der N-Düngung. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen.

SPICKER A. (2016): Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen. Dissertation, Technische Universität München.

STATISTISCHES BUNDESAMT (2016): Anbaufläche von Raps und Rüben in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2015 (in 1.000 Hektar). Online abrufbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28651/umfrage/anbauflaeche-fuer-raps-und-ruebsen-seit-1995..>

WALTER K., DON A., FUß R., KERN J., DREWER J. & FLESSA H.(2014): Direct nitrous oxide emissions from rapeseed oil cropping – a meta-analysis. GCB Bioenergy, 10.1111/gcbb.12223.

Anhang